

Caracterización de las combustiones anómalas producidas en un MEP-H2



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

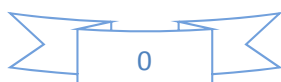
Santiago del Villar Olano

Pedro M. Diéguez Elizondo

Pamplona, 25 de Junio de 2014

ÍNDICE:

1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- ANTECEDENTES	4
3.- OBJETIVOS	6
4.- PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO	8
4.1.- ESTRUCTURA ATÓMICA Y PROPIEDADES ENERGÉTICAS	8
4.2.- COMBUSTIÓN Y PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS H ₂ -AIRE	13
5.- PRESENTACIÓN DEL MOTOR	15
5.1.- Ficha técnica del motor	16
5.2.- Curvas características	17
5.3.- Colector de admisión	18
5.4.- Parámetros de las válvulas y su accionamiento	20
6.- INSTALACIÓN DE SUMINISTRO DE HIDRÓGENO AL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO	24
7.- PROBLEMAS Y ANOMALIAS EN EL USO DE HIDRÓGENO COMO CARBURANTE	27
7.1.- Backfire	27
7.2.- Pre-ignición o pre-encendido	28
7.3.- Detonación	29
8.- INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS	30
8.1.- BANCO DE PRUEBAS	30
8.2.- CENTRALITA	30
8.3.- SENSOR DE PRESIÓN	31
8.4.- INSTRUMENTACIÓN DE SONIDO	32
9.- DESARROLLO, OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	34
9.1.- PRUEBA REALIZADA A 2000 RPM	37
9.2.- PRUEBA REALIZADA A 2500 RPM	46
10.- PROCESADO DE DATOS	52
11.- CONCLUSIONES	54
12.- LÍNEAS FUTURAS	56
13.- BIBLIOGRAFÍA	57



1.- INTRODUCCIÓN

La energía es un bien necesario para el progreso económico y el bienestar de la humanidad. Gran parte de ella no disfruta de energía suficiente y es preciso que llegue a disponer de ella. El suministro suficiente de energía es uno de los principios esenciales de una economía más justa y eficiente, y uno de los pilares básicos del desarrollo sostenible, por lo que es preciso ahondar en el conocimiento científico y tecnológico de todas las posibles fuentes de energía, y de los mecanismos para su explotación segura, limpia y económica. Esta tarea debe abordarse por todos los países en función de sus capacidades y necesidades, teniendo en cuenta que la energía conforma un sector muy globalizado, aunque muy heterogéneamente repartido, tanto en recursos como en consumo.

Es preciso pensar a largo plazo en un tema como el de la energía, y cierto nivel de planificación es imprescindible. La explotación de los recursos energéticos mediante las tecnologías adecuadas, y la puesta en valor de nuevos recursos y tipos de recursos, son tareas que necesitan tiempo, y que a la vez han de hacerse compatibles con las demandas energéticas de cada país, y del planeta en su conjunto.

El panorama energético mundial es cambiante y exige de los investigadores mejoras continuas para adaptarse a la situación real en la que vivimos. La primera Revolución Industrial fue fundamentalmente una revolución energética, con la fuerza del vapor como elemento agente y la combustión del carbón como fuente de energía. Otras revoluciones energéticas posteriores produjeron aún mayores efectos socioeconómicos y personales en el modo de vida. Tales son los casos de la automoción, posibilitada por la revolución petrolífera de finales del siglo XIX, y la electricidad, también iniciada en esas fechas, siendo ambas dos factores claves del siglo XX, como todavía lo son del XXI.

Aún y todo, la estructura del sector energético, que se basa en inversiones cuantiosísimas realizadas en estos últimos decenios, más las que están en curso o en proyecto, presenta unas inercias considerables, pues las fuentes convencionales gozan de su preeminencia actual debido a unas características inherentes que las hacen particularmente rentables y apropiadas para el tipo de necesidades energéticas que presenta la humanidad. Esto conlleva un problema fundamental dividido en dos cuestiones distintas pero íntimamente relacionadas. En primer lugar, las fuentes convencionales de energía pronto van a agotarse (exceptuando a la nuclear), debiendo buscar otras soluciones. En segundo lugar, la contaminación ambiental es cada vez más

grave; se están encendiendo alarmas en todos los sectores tanto por la contaminación atmosférica, como por la explotación irracional y no sostenible de los recursos naturales.

A mediados de siglo la fusión termonuclear no estará disponible. Las energías renovables tampoco podrán suministrar todavía una parte predominante del consumo. El petróleo y gas corren el riesgo de tener precios prohibitivos para la producción eléctrica; sólo el carbón y la energía de fisión garantizan la producción a precios razonables, aunque presentan efectos ambientales y de seguridad que se han de valorar adecuadamente. Parece ser que todas las fuentes de energía convencionales serán necesarias en el horizonte del 2050 y más allá, pero cabe hacerse una pregunta. ¿Se iniciará en el siglo XXI la era del hidrógeno?

En primer lugar es necesario indicar que el hidrógeno, a diferencia del carbón o el petróleo, no es un recurso natural, no se puede obtener de la naturaleza directamente. El hidrógeno es un portador de energía (como la electricidad), es necesario producirlo a partir de otras materias primas (agua, biomasa, recursos fósiles), y para convertir estas materias en hidrógeno hay que seguir unas transformaciones en las que se consume alguna fuente de energía primaria (nuclear, renovable o fósil). En la actualidad se utiliza el hidrógeno en multitud de procesos industriales, sin embargo, su papel hasta ahora ha sido el de un componente más dentro de estos. Por el contrario, lo que está emergiendo en el momento presente es la utilización del hidrógeno como nuevo vector energético que permite un desarrollo compatible con el respeto al medioambiente.

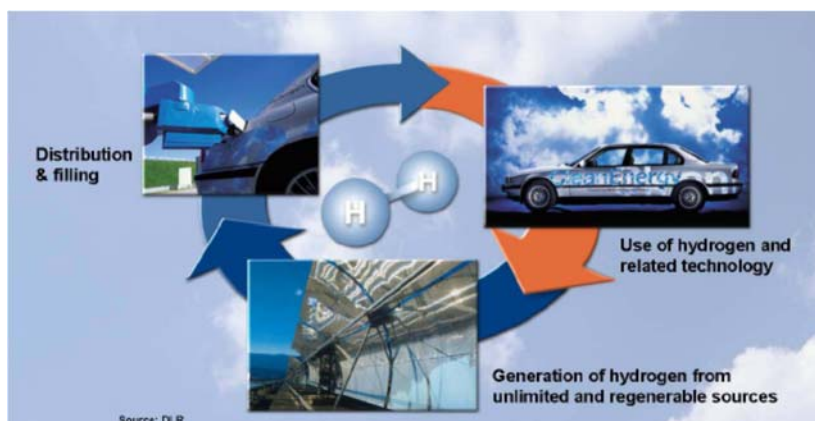


Figura 1.0.1 Ciclo cerrado del hidrógeno

Por otro lado, el hidrógeno ofrece a largo plazo un escenario de ciclo energético cerrado intrínsecamente limpio que constituye el gran atractivo de este portador de energía. Se trata de tomar agua de la naturaleza, separarla en sus componentes (oxígeno e hidrógeno) mediante electricidad de origen renovable, almacenar el hidrógeno, transportarlo, distribuirlo y finalmente, al utilizarlo siguiendo procesos térmicos convencionales (motores de combustión interna alternativos, o turbinas) o

electroquímicos novedosos (pilas de combustible), devolveríamos a la naturaleza la misma cantidad de agua que previamente habíamos tomado de ella. En la conversión térmica del hidrógeno se emitirían óxidos de nitrógeno (aunque en una proporción muy inferior a los emitidos con los combustibles fósiles), mientras que en la utilización con pilas de combustible las emisiones serían nulas.

Con energías renovables y agua, y utilizando como vectores energéticos el hidrógeno y la electricidad, sería posible atender a todas las necesidades energéticas con una emisión de contaminantes prácticamente nula. Si un escenario energético de este estilo llega a implantarse, entonces se podría afirmar que se habría producido la «revolución del hidrógeno» y se habría entrado en la era del hidrógeno.

Esta problemática energética necesita estudios cada vez más sofisticados. No obstante es preciso disponer de estudios y opiniones que sean independientes de los intereses económicos involucrados en el sector energético, pues la energía no es sólo un factor económico clave, sino un bien personal y colectivo, y a la vez, una problemática complejísima a largo plazo.

2.- ANTECEDENTES

En la actualidad las grandes empresas del sector energético y de la automoción están invirtiendo en el campo de la investigación del hidrógeno. Además de las razones medioambientales, las perspectivas de nuevas oportunidades de negocio son decisivas a la hora de promocionar este combustible. El apoyo que estas empresas reciben de las instituciones públicas favorece el empeño por conseguir que, en un futuro cada vez más cercano, un transporte más limpio sea una realidad. Un ejemplo de ello es la estrecha colaboración entre la empresa Acciona Energía (antigua Corporación Energía Hidroeléctrica de Navarra, EHN) y la Universidad Pública de Navarra, UPNA, para la investigación en este campo.

Fruto de esa colaboración se han realizado una serie de Proyectos Fin de Carrera cuyo objeto era el desarrollo de un sistema integrado de producción de hidrógeno renovable. En este sentido, el primer paso lo dieron José Ignacio Coloma Ferrer e Iñigo Sánchez Semberoiz en 2001 con el PFC titulado “Capacidad de EHN en la producción de hidrógeno”. En este proyecto se estudió el estado del arte de la tecnología de producción de hidrógeno.

Dicho proyecto abrió la línea de investigación de obtención de hidrógeno “renovable” a partir de energía eólica y, en concreto, su producción vía electrólisis del agua. Se puede entender también como la manera de almacenar la electricidad producida de forma renovable en los aerogeneradores en momentos en que la red no permita su absorción. Enmarcada en este contexto está la adquisición de un electrolizador alcalino por parte de la UPNA e instalado en el edificio de talleres. En torno a este hecho, se desarrollaron varios proyectos (Juan Biurrun Ruiz en 2004, Raquel Rojo Ochoa en 2005...).

Tras el estudio de la instalación del electrolizador y el estudio de la generación de hidrógeno renovable en dicha instalación con energía eólica, el proyecto defendido en 2006 por Raquel Oroz Oscáriz titulado “Producción de hidrógeno renovable a partir de energía eólica. Comportamiento de un electrolizador alcalino controlado por un emulador de las condiciones del viento.”, supuso un paso más en la línea de investigación del sistema híbrido (el formado por el emulador y el electrolizador).

Otro de los aspectos importantes estudiados en torno al hidrógeno en la UPNA es la seguridad, conforme a su manejo y aplicación. Las propiedades del hidrógeno lo hacen muy propenso a generar atmósferas inflamables en el caso de una fuga. Por tanto, estudiar las mezclas de hidrógeno-aire es fundamental desde el punto de vista de la seguridad de cara al potencial uso del hidrógeno. En torno a esta línea de

investigación se ha hecho hincapié en la simulación informática de fugas para el estudio de estas mezclas, como la experimentación necesaria para validar esos trabajos. María Fernández Boneta y Yolanda Llorente Pina realizaron sendos estudios computacionales de atmósferas explosivas por mezclas de hidrógeno y aire, descritos en sus PFC “Simulación informática de atmósferas explosivas”, y “Simulación informática de atmósferas explosivas de hidrógeno con ANSYS-CFX”, respectivamente. Otro proyecto experimental se centró en validar las simulaciones para el estudio de mezclas de hidrógeno-aire, “Experimentación sobre difusión de hidrógeno en aire”, 2006, por Miguel Briñas Herce.

La última línea de investigación a mencionar es la relativa a los motores de combustión interna alternativos de hidrógeno, en la que se enmarca este TFG. Esta línea se centra en la combustión del hidrógeno renovable en un motor, cuya finalidad puede ser tanto el transporte, como la producción de electricidad. De esta forma se puede ver caracterizado el hidrógeno como vector energético del futuro y se trata de la parte final del ciclo del hidrógeno (de esta aplicación en concreto, ya que existen innumerables ciclos en función de la utilización última del combustible). Como antecedentes se cuenta con el texto “Adaptación de un vehículo de gasolina convencional para su funcionamiento con hidrógeno”, estudio realizado por Carlos Sopena Serna y Daniel Ruiz Aranguren en 2005. Cabe señalar también la aportación de David Sáinz Casas con su PFC “Proyecto de diseño y construcción de un sistema de gestión electrónica para un motor de encendido provocado”, como experiencia previa a la conversión para la utilización con hidrógeno de un motor de gasolina.

Tras la puesta en marcha del prototipo de motor, con la utilización del hidrogeno como combustible, se han realizado dos proyectos con el interés de mejorar y entender el comportamiento del hidrógeno en un MEP. En 2007 Josu Iriarte Labalde realizó un PFC sobre “Simulación del proceso de combustión en un MCIA alimentado con hidrógeno” y en 2011 Jorge Trobajo San Martín presentó su PFC “Simulación y análisis experimental sobre combustión y balances térmicos en un H₂-MEP”.

3.- OBJETIVOS

Este proyecto global, en el que se enmarca este trabajo, pretende avanzar en el campo de la utilización del hidrógeno como fuente de energía del futuro, y en concreto, en sus aplicaciones. El trabajo del equipo de investigación de la UPNA respecto a esta línea se centra en la viabilidad de un prototipo de automóvil, con MCIA de encendido provocado alimentado por hidrógeno (H_2 -MEP). El presente proyecto se enmarca dentro de la colaboración que Acciona Energía tiene con el equipo liderado en la UPNA por Pedro M^a Diéguez Elizondo. El grupo del sector de las energías renovables se encarga de financiar el presente proyecto. Pero además, se ha contado con la colaboración de Volkswagen Navarra, empresa clave del sector de automoción en Navarra, la cual cedió un motor de gasolina 1.4l-55 kW para llevar a cabo el proyecto de investigación.



Figura 3.1.- Imagen corporativa de Acciona Energía y Volkswagen Navarra

Este trabajo de investigación trata de caracterizar las combustiones anómalas que se producen en el motor de hidrógeno. Este motor es el que previamente se ha estudiado y configurado para el automóvil utilitario de uso preferentemente urbano con las prestaciones adecuadas al entorno en el que va a circular, poniendo de manifiesto el bajo nivel contaminante que presenta frente a los vehículos dotados de MCIA alimentados con combustibles fósiles o biocombustibles.

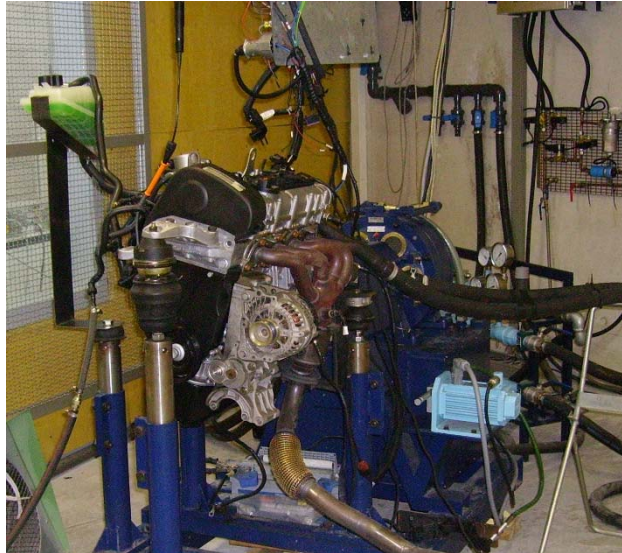


Figura 3.2.- Instalación del motor en el laboratorio del edificio de talleres. UPNA

El objetivo de este trabajo es analizar el proceso de combustión en un motor de combustión interna alternativo, MCIA, de encendido provocado y usando hidrógeno como combustible. Un óptimo proceso de combustión es la llave que abre la puerta a un idóneo funcionamiento del motor. Por tanto, analizaremos los diversos fenómenos, combustiones anómalas, que se producen en el proceso de combustión debido al aumento del dosado. En concreto estos sucesos limitan el rendimiento máximo creando un exceso de emisiones y una pérdida de potencia, en el mejor de los casos.

4.- PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno (del griego *hydro*, agua y *gennasin*, generar) fue reconocido como un elemento químico en 1776 por Henry Cavendish al demostrar su formación en la reacción de ácido sulfúrico con metales y su presencia en la molécula de agua. Más tarde, en 1785, Antoine Lavoisier le daría el nombre por el que lo conocemos.

El hidrógeno puro es un gas reactivo, incoloro, inodoro, insípido y no tóxico. Es por eso que es prácticamente imperceptible en caso de fuga, no es tóxico, pero, puede producir asfixia al sustituir la presencia de oxígeno en el aire. En condiciones normales de presión y temperatura forma un gas diatómico (H_2). Al aumentar la temperatura puede disociarse en átomos libres. Presenta un punto de ebullición de tan sólo 20,268 K (-252,7 °C), un punto de fusión de 14,025 K (-259,2 °C) y su densidad es mucho menor que la del aire (0,0899 kg/m³ frente a 1,2-1,3 kg/m³ del aire).

Es un gas extremadamente inflamable en aire en un amplio rango de concentraciones. Se quema en presencia del aire formando, en ausencia de impurezas, una llama azul pálido casi invisible a la luz del día. También es peligrosa su despresurización rápida, ya que a diferencia del resto de gases, al expandirse por encima de -40 C° se calienta, pudiendo inflamarse.

4.1.- ESTRUCTURA ATÓMICA Y PROPIEDADES ENERGÉTICAS

El hidrógeno es el primer y más sencillo elemento de la tabla periódica y su número atómico es 1. Es el elemento químico más ligero (1,00794 unidades de masa atómica) y el más abundante del Universo, estando las estrellas, durante la mayor parte de su vida, formadas principalmente por este elemento en estado de plasma. Sin embargo, en estado libre sólo se encuentra en muy pequeñas cantidades (una fracción de 1 ppm en volumen) dentro de la atmósfera. Combinado con otras sustancias, aparece por ejemplo en el agua (su compuesto más importante y abundante) y en compuestos orgánicos como los hidrocarburos.

Su isótopo más abundante, el propio H, está formado por un único par protón-electrón y no posee neutrones. Químicamente, la estructura atómica de un único electrón orbitando entorno a un núcleo, es altamente reactiva. Es por esto que los átomos de hidrógeno normalmente aparezcan combinados, creando moléculas de hidrógeno (H_2). Esta molécula es la más ligera, la más pequeña, y está entre las más simples. Además es relativamente estable.

La **alta reactividad química** es lo que caracteriza a los combustibles gaseosos. La combustión como tal, ocurre cuando las moléculas de combustible, se unen con las del oxígeno (en el aire) creando así nuevas moléculas con un menor estado de energía. La reacción química viene acompañada de una producción de energía, que aumenta a medida que las moléculas reaccionan. Las reacciones químicas necesitan de una cantidad de energía para que comiencen (energía de activación), pero una vez que comienzan, la propia reacción se alimenta de la energía que se genera de la unión de moléculas, para desarrollarse y avanzar como efecto domino. Esto es la **combustión**. En el caso de la combustión del hidrógeno, la reacción química es muy rápida.

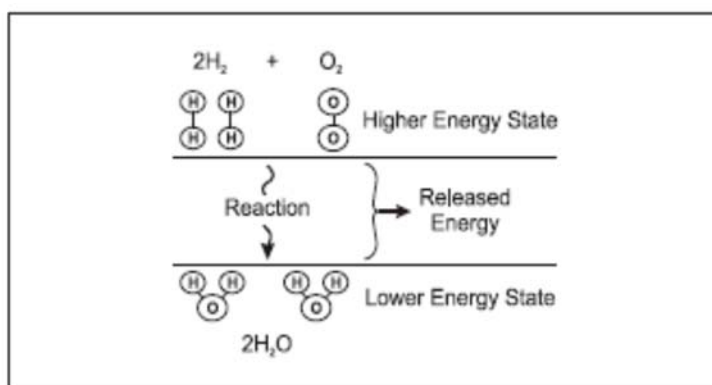


Figura 4.1.1.- Reacción entre el hidrógeno y el oxígeno y calor desprendido por dicha reacción.

Cada combustible, en el proceso de combustión, libera una cantidad fija de energía denominada poder calorífico. Esta variable denota la cantidad de energía liberada por unidad de masa del combustible. Como podemos observar en la **Tabla 4.1.1**, el hidrógeno posee el valor más elevado, por encima de otros combustibles, como el metano o la gasolina, a los que supera en más de 2,5 veces.

	Hidrógeno	Gasolina	Diesel	Gas Natural	Metanol
Densidad [kg/m ³]	0,0898	702	855	0,71	799
Densidad Energética (en volumen) [MJ/m ³]	10,783	31200	36500	36,1	18000
Densidad Energética (en masa) [MJ/kg]	120	42,7	41,9	50,4	19,9

Tabla 4.1.1.- Comparación de la energía y de la densidad del hidrógeno, con la de distintos combustibles.

Sin embargo, a pesar de esa gran cantidad de energía liberada en el proceso de combustión, el hidrógeno posee una densidad baja, y esto hace que la energía desprendida por unidad de volumen, sea realmente baja. Es decir, el hidrógeno posee una **densidad de energía, baja**. Podríamos definir esto como la medida de cuanto están de compactas las moléculas de hidrógeno en una mezcla combustible. La baja densidad del hidrógeno, lo convierte en un gran inconveniente a la hora de quemarlo, ya que necesitamos un gran volumen para igualarlo a un depósito de gasolina o de gasóleo.

Tecnología de almacenamiento del hidrógeno	Volumen de hidrógeno en 8,67kWh	Volumen de gasolina en 8,67kWh
Gas (Presión atmosférica)	3107 litros	1 litro
Gas (200 bar)	13 litros	
Gas (700 bar)	6,4 litros	
Líquido(-253 C°)	3,6 litros	
Hidruros metálicos (MgH ₂)	2,3 litros	
Hidruros metálicos (Mg ₂ FeH ₆)	1,7 litros	

Tabla 4.1.2.- Comparativa de densidades de energía del hidrógeno con 1 litro de gasolina.

Para llevar a cabo el proceso de combustión de un combustible, existen 2 propiedades muy importantes a tener en cuenta, que nos servirán para una correcta combustión y para medidas de seguridad. Estas propiedades son, el **rango de inflamabilidad** y el **rango de detonación**.

El rango de inflamabilidad de un gas se define en términos de su límite de inflamabilidad inferior y su límite de inflamabilidad superior. El límite inferior es la concentración mínima de gas que podrá mantener la propagación del proceso de combustión (de la llama); por debajo de ese límite no hay suficiente combustible para la combustión, la mezcla es demasiado pobre. El límite superior es la máxima concentración de gas que podrá mantener la propagación de la llama; por encima de este límite no hay suficiente oxígeno para mantener la combustión, la mezcla es demasiado rica.

	Límite inferior de inflamabilidad		Límite superior de inflamabilidad
Volumen de hidrógeno en aire	4,1%	⇔	75%
Masa de hidrógeno en aire	0,30%	⇔	17%

Tabla 4.1.3.- Límites de inflamabilidad para el hidrógeno en volumen y en masa.

El hidrógeno es inflamable en aire en un amplio rango de concentraciones. En las tablas anteriores, podemos apreciar los rangos de inflamabilidad, en volumen y en masa, del hidrógeno en aire. Estos datos de los rangos de inflamabilidad son válidos a temperatura ambiente. Pero si la temperatura aumenta, estos rangos varían y se amplían todavía más, como podemos observar en la siguiente figura.

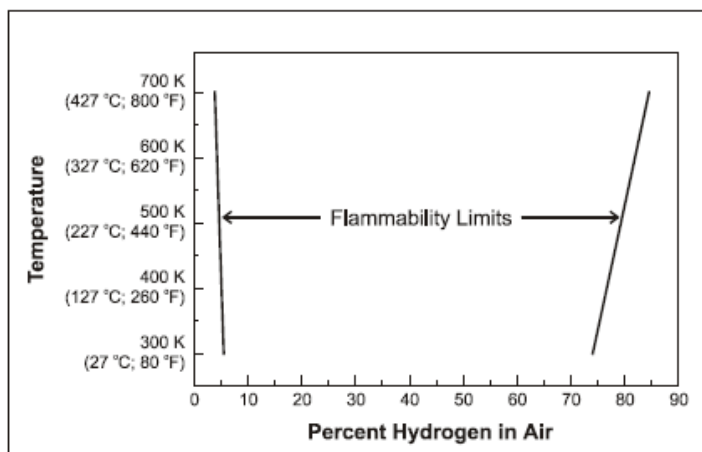


Figura 4.1.2.- Límites de inflamabilidad para el hidrógeno, en función de la temperatura y la presión.

Si comparamos los límites de inflamabilidad del hidrógeno con los límites de otros combustibles comunes se puede observar que el hidrógeno posee el rango más amplio. Puede llegar a ser muy útil, ya que se pueden usar mezclas muy pobres para una combustión, pero a la vez este amplio rango posibilita la combustión cuando no se desea.

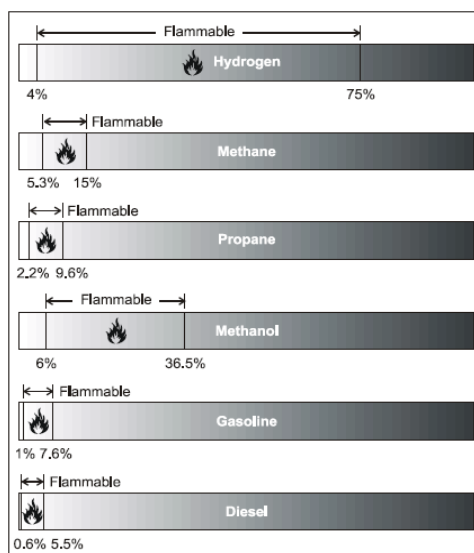


Figura 4.1.3 Comparación de los rangos de inflamabilidad de distintos combustibles a temperatura ambiente.

Dependiendo de las condiciones, se puede dar una **detonación** o una **deflagración**. El rango de detonación viene fijado por el límite inferior de detonación y el límite superior de detonación. Estos términos a menudo son usados intercambiabilmente con los límites inferior y superior de inflamabilidad, aunque no son lo mismo. El límite inferior de detonación es la concentración de gas más baja que mantendrá una explosión cuando el hidrógeno se mezcle con el aire, contenido en un recinto y dada la ignición. De manera similar, el límite superior de detonación es la concentración más alta de gas que sostendrá la explosión.

Una explosión es diferente de un incendio o combustión. Para la detonación la combustión debe ser en un habitáculo cerrado, permitiendo a la presión y temperatura elevarse hasta unos niveles suficientes para destruir violentamente el contenedor. Por esta razón, es más peligroso un escape de hidrógeno en un recinto cerrado que liberarlo directamente al exterior.

El hidrógeno es también explosivo en presencia de aire en un amplio rango de concentraciones. Se muestran en la siguiente tabla:

	Límite inferior de detonabilidad		Límite superior de detonabilidad
Volumen de hidrógeno en aire	18,3%	⇔	59%
Masa de hidrógeno en aire	1,5%	⇔	9,1%

Tabla 4.1.4 Límites de detonabilidad para el hidrógeno en volumen y en masa

4.2.- COMBUSTIÓN Y PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS H₂-AIRE

Las propiedades físicas y químicas del hidrógeno, son bastante diferentes de los combustibles líquidos más comúnmente usados, como la gasolina o el gasóleo.

El hidrógeno puede quemarse directamente para la generación de electricidad mediante turbinas de gas o directamente como combustible de motores. Las principales ventajas de este compuesto se centran en las elevadas eficacias que pueden alcanzarse y en que el único producto de su combustión es vapor de agua. Comparado con los combustibles fósiles, es casi inocuo para el medio ambiente y no contribuye al efecto invernadero. No produce monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos no quemados, ni partículas de carbono. Los únicos contaminantes son óxidos de nitrógeno, que pueden reducirse a niveles muy bajos.

La combustión entre el aire y el hidrógeno posee unas características, que mejora a la de los actuales combustibles. Como veremos en la tabla que se muestra a continuación, el hidrógeno posee importantes ventajas con respecto a los combustibles actuales.

Propiedad	Hidrógeno	Gasolina	Metano
Densidad del gas (kg/m ³)	0,0838	5,11	0,717
Temperatura de auto-ignición (K)	858	503-743	813
Mínima energía para la ignición (mJ)	0,02	0,25	0,28
Límites de inflamabilidad en el aire (%)	4,1 – 75	1,2-6	5,3-15
Límites de detonación en el aire (%)	18,3 – 59	1-3	6-13
Temperatura de la llama en aire (K)	2318	2473	2148
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	120	44	50
Poder Calorífico Inferior (MJ/m ³)	10,22	216,38	33,95
Velocidad laminar de llama (m/s)	1,9	0,37-0,43	0,38
Energía de explosión (kg TNT/m ³)	2,02	44,22	7,03
Coeficiente de difusión a NTP (cm ² /s)	0,61	0,05	0,189
Composición estequiométrica, NTP (% Vol.)	29,53	1,65	9,48
Dosado Estequiométrico (masa)	0,029	0,0664	0,058

Tabla 4.2.1 Tabla de propiedades del hidrógeno

Como podemos observar en la tabla, el hidrógeno posee una **energía de ignición** mucho menor que otros combustibles como el caso de la gasolina o el metano. Si añadimos a esto su **alto rango de inflamabilidad**, del que ya hablamos anteriormente, podemos decir que el hidrógeno es el más fácil de quemar.

Además, el hidrógeno posee una **temperatura de auto-ignición** mayor que la del metano, propano o gasolina, y esto ayuda a evitar combustiones indeseadas en ausencia de fuentes de ignición externas. Todas estas características, nos aseguran una correcta, y casi completa combustión de los reactivos para cualquier tipo de mezcla (rica o pobre).

La combustión del hidrógeno es muy rápida, con **velocidades de llama** cerca 5 veces mayores que la de los otros 2 combustibles. La **temperatura de la llama**, es del orden de la de la gasolina. En este sentido, no se distancia tanto de nuestro combustible más usado, y esto puede ser una ventaja a la hora de acondicionar un motor convencional al hidrógeno, ya que evitamos cambios termodinámicos en el motor.

Un **coeficiente de difusión** mayor que el de la gasolina o el metano, nos garantizará una correcta y homogénea mezcla dentro del motor, evitando así la estratificación, zonas con mezclas más pobres y otras más ricas, que podrían causar una combustión anormal.

La Mínima energía de ignición es la cantidad de energía necesaria para que una mezcla inflamable de hidrógeno se queme. El hidrógeno reacciona violentamente en presencia de oxígeno cuando se suministra una energía térmica de activación muy pequeña.

A la hora de hablar de claras desventajas con respecto a otros combustibles, el mayor problema: **la baja densidad del hidrógeno**. El hidrógeno desata más energía que otros combustibles al quemarse. La energía por cada kilogramo es 3 veces mayor que la de la gasolina, sin embargo, la baja densidad del hidrógeno, hace que la energía por unidad de volumen sea 20 veces menor que la de la gasolina y 3 veces menor que la del metano.

El dosado estequiométrico en una mezcla estequiométrica hidrógeno-aire el 30% en volumen es ocupado por el hidrógeno. En masa (0.029 moles H_2 /moles mezcla), el dosado estequiométrico del hidrógeno es menor que el de otros. Pero en volumen, necesitamos un volumen mayor que el de otros combustibles. En motores de combustión interna, en los que el volumen de la cámara tiene unas dimensiones dadas, esto supone un problema, ya que el hidrógeno ocupa gran parte de la esta.

5.- PRESENTACIÓN DEL MOTOR

El motor que se utilizará para realizar este estudio es uno de la gama de motores con los que se ha fabricado el modelo comercial Volkswagen Polo VW240. En concreto es un motor de gasolina de 1390 cm³ y una potencia máxima de 59 kW.

Se trata de un motor que empezó a ensamblarse a diferentes turismos del consorcio en 1998. Volkswagen introdujo en este motor varias medidas de diseño respecto a otros modelos anteriores, obteniéndose una versión mucho más desarrollada. Entre otras mejoras se encuentran las siguientes:

- Colector de admisión en material plástico
- Culata con carcasa de los árboles de levas
- Impulsión de las válvulas a través de balancines de rodillo
- Bloque motor en fundición a presión de aluminio

Obteniendo las mismas prestaciones en comparación con los modelos predecesores, la suma de estas medidas de diseño se tradujo en:

- Reducción del consumo y del peso
- Cumplimiento de las normativas más estrictas sobre gases de escape en Europa



Figura 5.0.1 – Volkswagen Polo A04

5.1.- Ficha técnica del motor

En la siguiente tabla se resumen las principales características del motor:

MOTOR 1.4 I, 16V, 59 kW	
Combustible	gasolina
Potencia máxima CV - kW / rpm	80 - 59 / 5000
Par máximo Nm / rpm	126 / 3800
Situación	delantero transversal
Número de cilindros	4 en línea
Material del bloque / culata	aluminio / aluminio
Diámetro x carrera (mm)	76.5 x 75.6
Cilindrada (cm³)	1390
Relación de compresión	10.5
Distribución	4 válvulas por cilindro. Dos árboles de levas en la culata.
Alimentación	Inyección indirecta multipunto

Tabla 5.1.1 – Parámetros fundamentales del conjunto motor

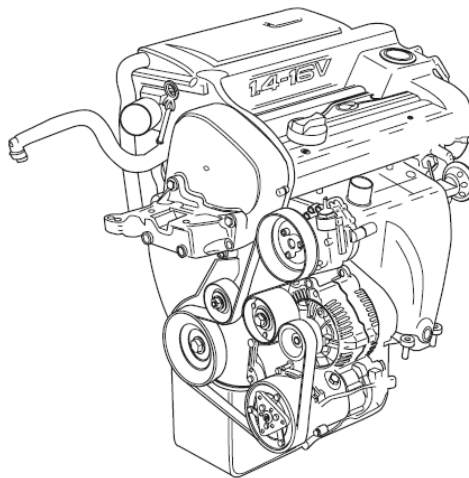


Figura 5.1.1 – Detalle del motor 1.4 I, 16V, 59 kW.

5.2.- Curvas características

Estas son las curvas de par motor efectivo y potencia efectiva:

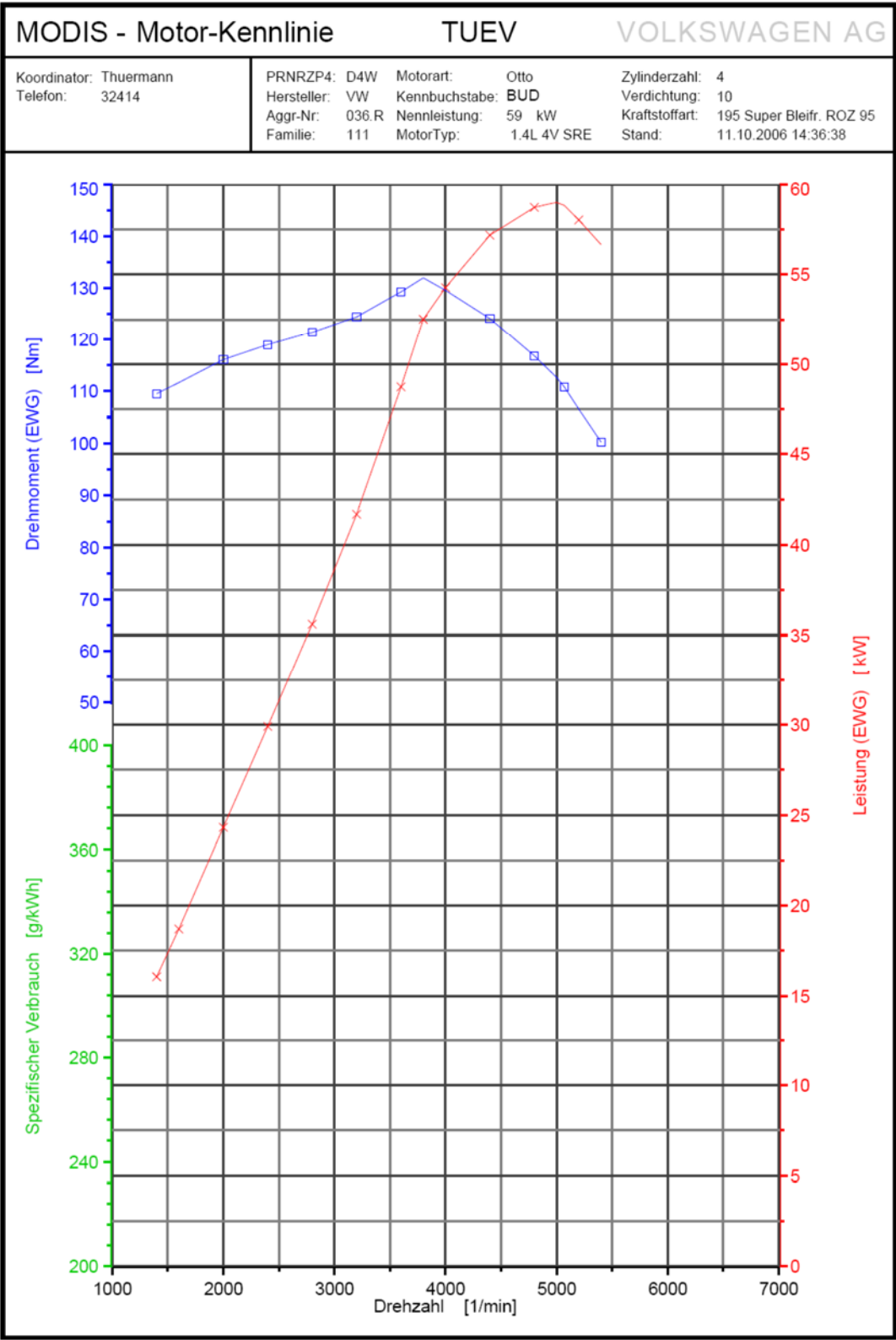


Fig. 5.2.1 – Curvas características del motor 1.4 l, 16V, 59 kW.

5.3.- Colector de admisión

Sobre el colector de admisión se instalan los inyectores, el distribuidor de combustible y la unidad de mando de la válvula de mariposa. El material del colector de admisión, con el que va equipado el motor, es de plástico de poliamida, de alta calidad, resistente por corto tiempo a efectos de temperatura hasta de 140 °C. La elección de plástico como material hace que esta pieza resulte un 36% más ligero que un colector similar en aluminio.

Sin embargo, teniendo en cuenta que el motor va a ser adaptado para poder funcionar alimentado con hidrógeno, se montará en él un colector de admisión de aluminio, para que éste esté adaptado a las exigencias que plantea el nuevo motor; concretamente, en materia de seguridad. Este colector también es un diseño del consorcio Volkswagen y es la empresa italiana Magneti Marelli la encargada de fabricarlo. En las siguientes figuras se presenta la geometría externa del colector.

En la siguiente figura se presenta la zona del colector que se unirá a la culata. Las cuatro secciones de la imagen son las secciones finales de los cuatro colectores que forman el conjunto colector de admisión. En el detalle se puede observar el alojamiento donde se instalarán los inyectores de gas específicos para este motor de hidrógeno.

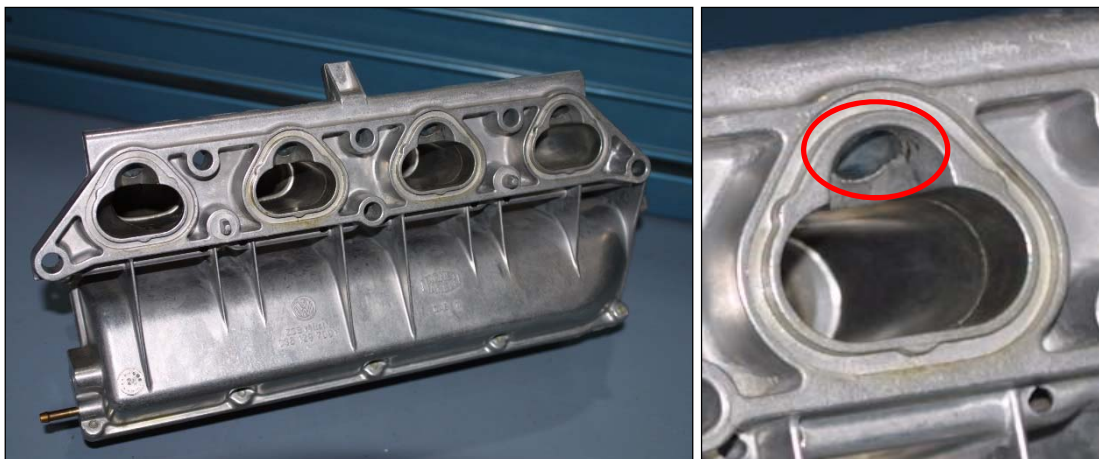


Figura 5.3.1 – Colector de admisión de aluminio. Detalle de la sección de unión con la culata.

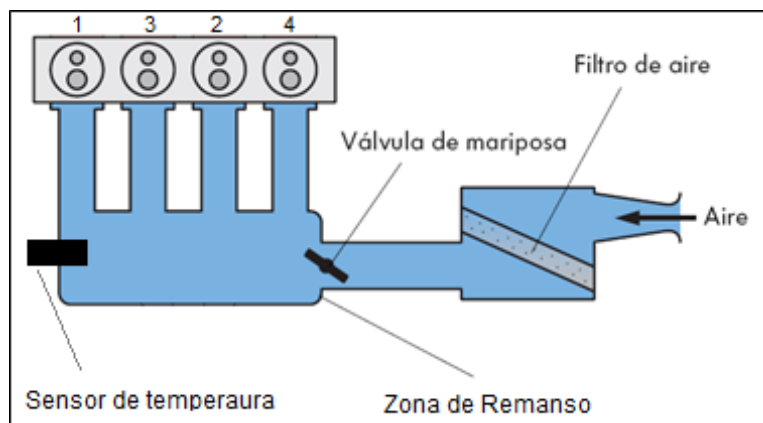


Figura 5.3.2 – Esquema general del conjunto de admisión.

En la figura 5.3.2 también se puede observar justo debajo de esas secciones una parte metálica que contiene varios nervios que sirven para unirla al conjunto. Se trata de la cámara de remanso, región del colector de admisión de donde parten los cuatro colectores individuales. A esa región llega el aire tras la primera estrangulación, la de la válvula de mariposa, la cual determina el grado de carga del motor. También podemos observar en esa figura la posición del sensor de temperatura. En la figura 5.3.3 se presenta otra imagen del colector, donde se ven los cuatro colectores, los cuatro orificios donde instalar los inyectores y la sección de la válvula de mariposa. Más allá de esa sección se encuentra la cámara de remanso.

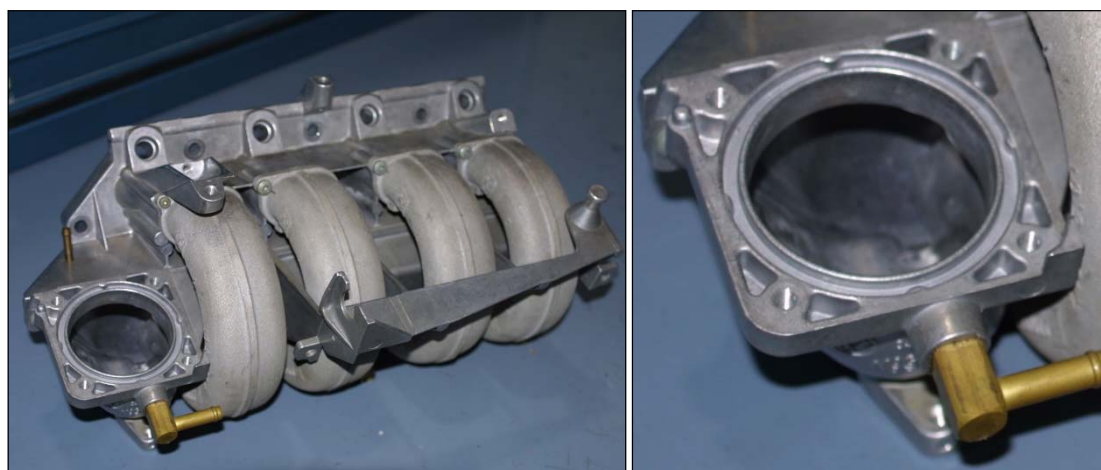


Figura 5.3.3 – Colector de admisión de aluminio. Sección de válvula mariposa.

5.4.- Parámetros de las válvulas y su accionamiento

La información en relación con las válvulas del motor es la siguiente:

Válvula	Diámetro [mm]	Alzada [mm]	Ángulos de la Distribución	
Admisión	29.50	8.40	AAA	19.1º
			RCA	15.1º
Escape	26.00	8.60	AAE	20.2º
			RCE	15.3º

Tabla. 5.4.1 – Parámetros de las válvulas

Este es un motor de 4 tiempos. Esto significa que el pistón realiza un ciclo de 4 carreras de las cuales solo 1 es de trabajo útil, esto equivale a un giro del cigüeñal de 720°. Se pueden definir las carreras como: admisión, compresión, expansión y escape.

Durante la admisión entran los gases, combustible y comburente, en el interior de la cámara de combustión y del cilindro, esto se debe a la creación de una depresión por la carrera que va desde el punto muerto superior hasta el inferior. Para este proceso se utilizan dos válvulas por cilindro que permiten el paso de los gases.

Durante la compresión los gases son comprimidos desde el punto muerto inferior hasta el superior y finalmente comienza la combustión, justo antes del punto muerto superior.

Durante la expansión, la combustión de los gases realiza el trabajo útil mediante expansión. Y finalmente la carrera de escape que sirve para sacar del cilindro los gases tras la combustión. Para ello se utilizan, como en el caso de admisión, dos válvulas por cada cilindro.

Para mejorar el llenado de los gases de admisión se introduce, sobre las válvulas de admisión, un grado de adelanto a la apertura de admisión (A.A.A.) y un retraso al cierre de admisión (R.C.A). Esta mejora se apoya en las inercias que acarrearán los gases.

Para mejorar el escape de los gases después de la combustión se introduce, sobre las válvulas de escape, un adelanto a la apertura de escape (A.A.E.) y un retraso al cierre de escape (R.C.E.). Esta mejora también se ampara en las inercias de los gases.

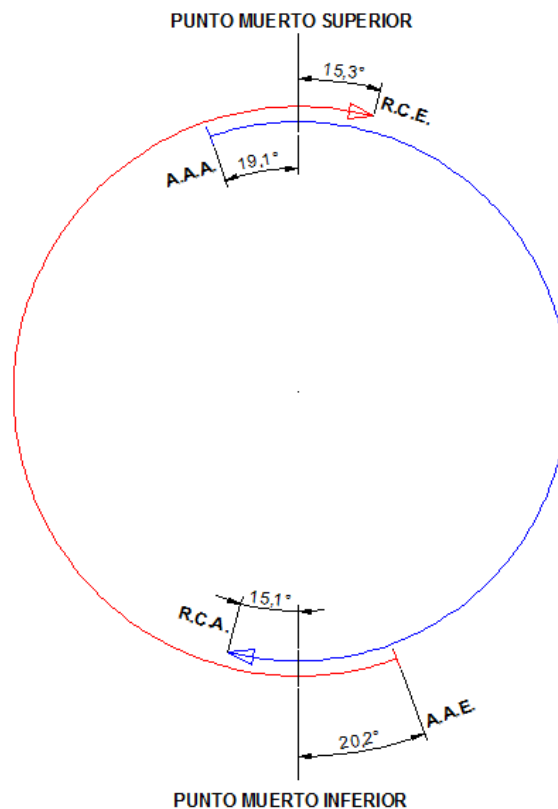


Figura 5.4.1 – Diagrama de distribución.

En este gráfico podemos visualizar la apertura y cierre de las válvulas, del motor en cuestión, en función de los grados de giro del cigüeñal. En azul podemos ver los grados en los que las válvulas de admisión se encuentran abiertas, mientras que en rojo sería la apertura de las válvulas de escape.

Cabe señalar que los valores del diagrama de distribución, se tomaron con una referencia de 1 mm desde la posición de reposo de ambos tipos de válvulas. Es decir, los ángulos relativos a los avances a la apertura, AAA y AAE, se miden tras un desplazamiento de magnitud 1 mm en la dirección del eje de las respectivas válvulas en su apertura. Por el contrario, los ángulos del retraso al cierre, RCA y RCE, son medidos cuando falta 1 mm en la dirección de sus ejes para el cierre de los colectores correspondientes respecto de la cámara de combustión. Esto se debe a la geometría de las levas.

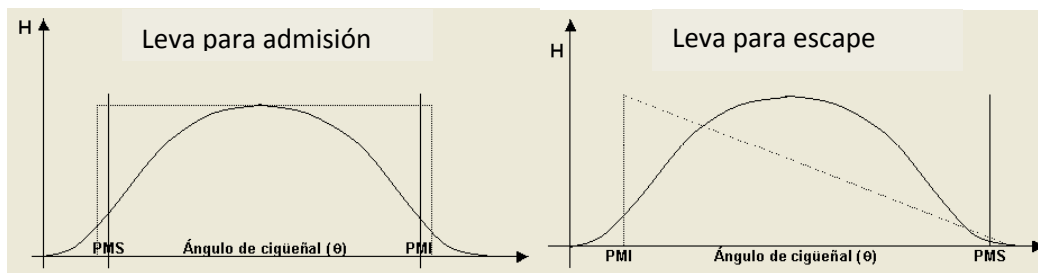


Figura 5.4.2 – Diseño de las válvulas.

Las levas tienen una geometría que abre y cierra las válvulas amortiguando las aceleraciones bruscas en la parte mecánica de la culata. Además en ese rango la apertura es tan pequeña que no debería variar mucho la entrada o salida de gases. Estos parámetros son puramente mecánicos y vienen determinados por la fabricación del Polo 1.4 en cuestión.

El mecanismo que acciona las válvulas está alojado en la culata y en la carcasa del árbol de levas. Los árboles de levas son introducidos longitudinalmente en la carcasa y se apoyan en tres cojinetes. La impulsión de las válvulas, compuesta por válvula, balancín flotante de rodillo y elemento hidráulico de apoyo, es un conjunto alojado en la culata. Este tipo de impulsión tiene varias ventajas, entre ellas, menor fricción y menos masas en movimiento. Esto se traduce en que el motor tiene que aplicar menos fuerza para mover los árboles de levas. Su funcionamiento es sencillo (figura 5.4.4). El elemento de apoyo hace las veces de punto de giro para el movimiento del balancín. La leva actúa sobre el rodillo y oprime el balancín hacia abajo. El otro extremo del balancín acciona la válvula. Debido a que el brazo de palanca entre el rodillo y el apoyo es más corto que entre la válvula y el apoyo, se consigue una gran carrera de la válvula, con un lóbulo relativamente pequeño en la leva.

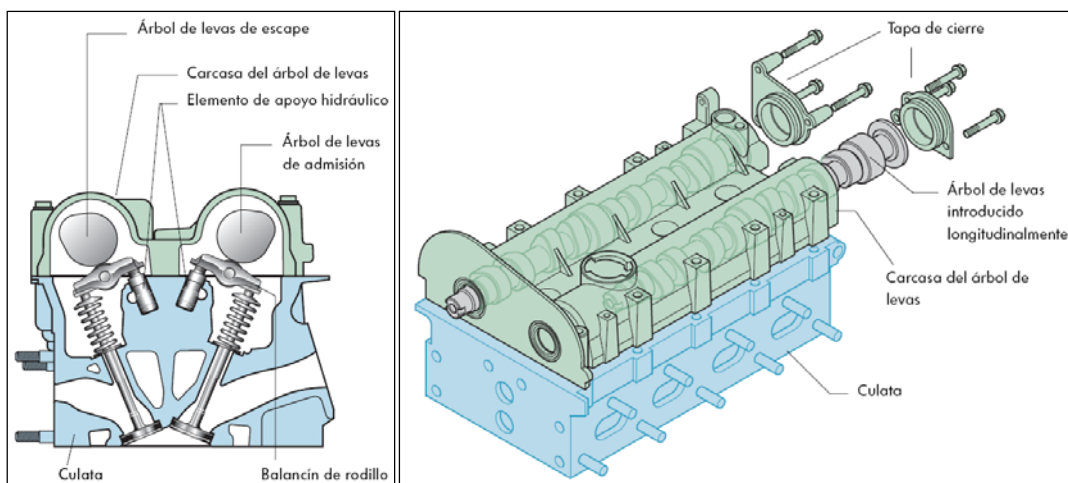


Figura 5.4.3 – Mecanismo de accionamiento de las válvulas.

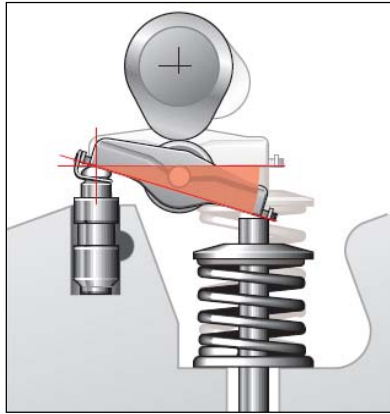


Figura 5.4.4 – Accionamiento de las válvulas.

A continuación, se presentan las imágenes de estos elementos tal y como se fotografiaron en el laboratorio de máquinas y motores térmicos en el edificio de talleres de la UPNA.



Figura 5.4.5 – Culata. Zona de balancines y zona de cámaras de combustión.



Figura 5.4.6 – Carcasa del árbol de levas.

6.- INSTALACIÓN DE SUMINISTRO DE HIDRÓGENO AL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO

La instalación de hidrógeno debía cumplir las siguientes especificaciones:

- Caudal de hidrógeno suficiente para llevar el motor a su plena potencia
- Nitrógeno para purgar en caso de emergencia
- Detección de fugas de hidrógeno mediante sensores.
- Sistema de control de alimentación con purga automática.

La instalación de hidrógeno, instalada por *Air Liquide*, consiste en una botella de hidrógeno y otra de nitrógeno, ubicadas fuera de la sala del motor. Desde allí y a través de los diferentes manorreductores y electroválvulas manda el combustible a través de tubos de acero inoxidable que llegan dentro de la sala del motor.

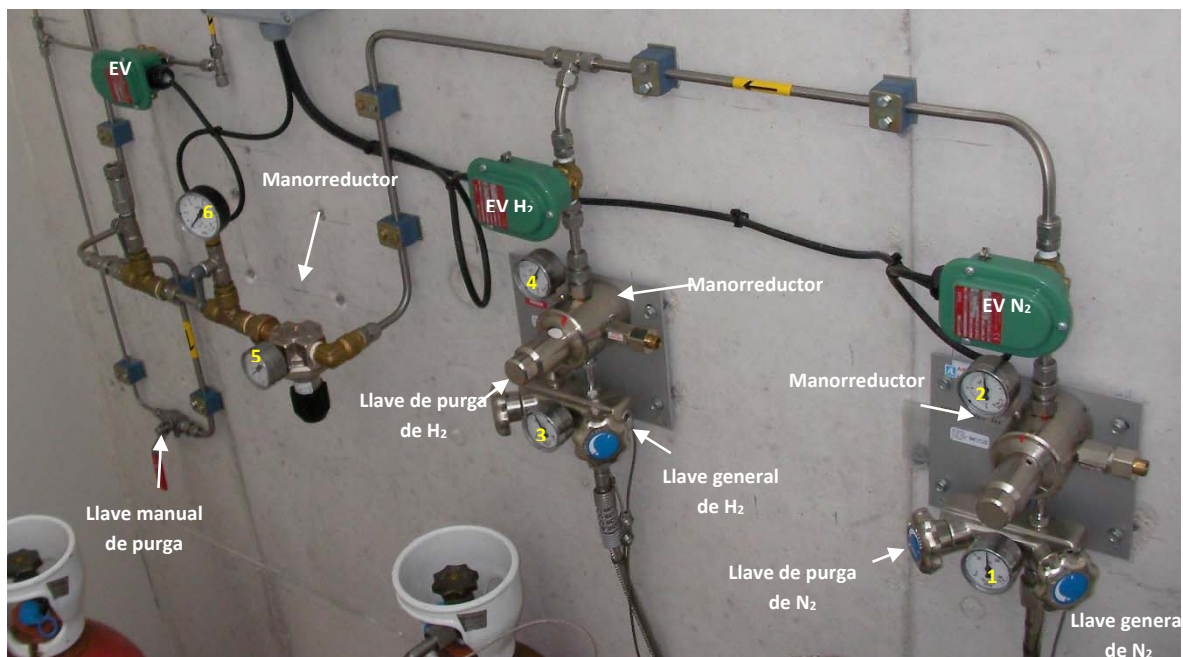


Figura 6.1. Botellas, manorreductores y electroválvulas

En la figura 6.1, las botellas proporcionan una presión de hasta 200 bares, que a través de los manorreductores principales se reduce a unos 10 bar. Tanto la línea de hidrógeno como la de nitrógeno tiene su propia electroválvula y a su salida se unen en una misma línea de gas. Esto se hace para poder utilizar hidrógeno o purgar con nitrógeno. Luego hay otro manorreductor que reduce la presión a unos 8 bares y estabiliza completamente la presión. La otra electroválvula es la de purga, que barre todo el hidrógeno acumulado en la línea que va hasta el motor.

Es por ello que hasta la sala del motor llegan dos líneas de inoxidable. Una es de alimentación y otro de purga. Como se observa en la figura 6.2, la línea de alimentación lleva intercalado un caudalímetro de hidrógeno anclado a la pared y al final de la línea lleva un manorreductor y un antirretorno. Este manorreductor reduce la presión hasta la presión de trabajo, unos 3 bares.



Figura 6.2. La instalación en el interior de la sala de motores.

La válvula antirretorno está presente por si sucediera un backfire, cosa poco probable porque en la línea no hay oxígeno. En paralelo a la línea de alimentación del hidrógeno va otra línea de retorno del combustible que irá conectada al acumulador del motor. Esta línea de retorno permite la purga del sistema y va conectada a la electroválvula de purga.

Finalmente, tal como muestra la figura 6.3, estas líneas de gas van conectadas al acumulador del motor. Se dispone de un manómetro en la línea de alimentación para ver cómodamente la presión de trabajo.

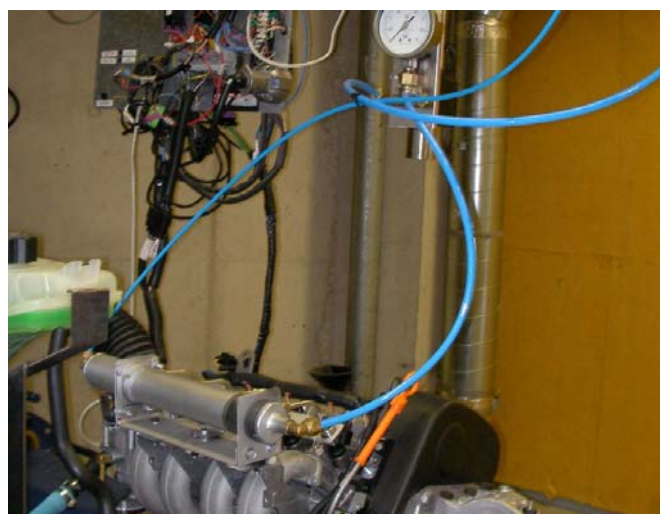


Figura 6.3. Alimentación del motor

El acumulador del motor, permite que la caída de presión con cada inyección no caiga por debajo de 0,1 bar. El acumulador va conectado a los cuatro inyectores de gas encajados en el colector de admisión. Los inyectores son especiales para gases, entre ellos el hidrógeno, del fabricante americano Quantum.

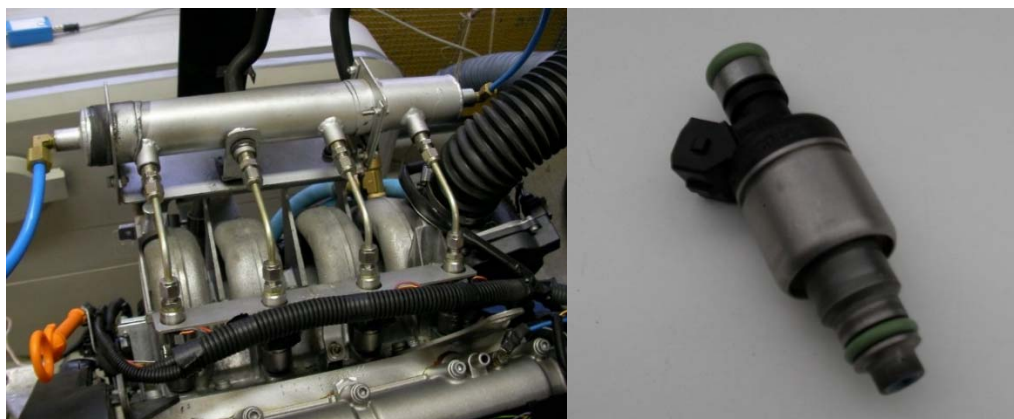


Figura 6.4. Acumulador e inyectores en el colector de admisión (izqda) Inyector de gas Quantum (drcha)

Una vez que el armario de control de electroválvulas estuvo instalado se verificó su estanqueidad. Para ello se aplicó presión con nitrógeno al circuito, se cerró después la válvula de la botella y se observó si el manómetro registraba alguna caída de presión.

En la siguiente ilustración se puede ver con más detalle un esquema de la instalación con todos sus elementos.

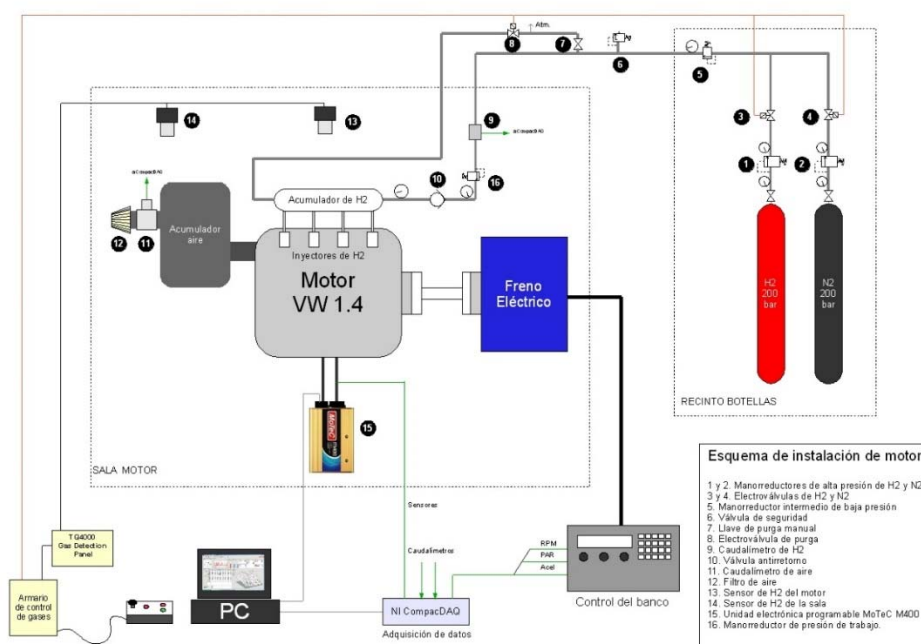


Figura 6.5 Esquema de la instalación de hidrógeno

7.- PROBLEMAS Y ANOMALIAS EN EL USO DE HIDRÓGENO COMO CARBURANTE

Los motores de combustión interna de hidrógeno, visto como una nueva solución o un desarrollo tecnológico frente al actual problema de la contaminación, presenta una serie de ventajas muy significativas. Esto se debe a que la configuración del propio motor es conceptualmente la misma que la de los motores de combustión interna alternativos de encendido provocado, con la utilización de gasolina como carburante.

Sin embargo, el hidrógeno tiene unas propiedades muy particulares. Lo hemos definido como mejor combustible que la gasolina, pero existe la posibilidad de que ocurran fenómenos durante la inyección o la combustión, que entorpezcan el correcto funcionamiento del motor o incluso que lleguen a deteriorarlo.

La eliminación de las anomalías en la combustión del hidrógeno es un reto, y se ha probado que tiene mucha importancia a la hora de definir un correcto diseño del motor, una correcta mezcla y un buen control de carga.

7.1.- Backfire

Este suceso ocurre si la mezcla fresca de hidrógeno se quema y la válvula de admisión se encuentra abierta, propagándose la combustión por el colector de admisión. De esta definición se puede deducir que el *backfire* sólo puede ocurrir en motores de inyección indirecta o en los de carburador, en ambos entra al cilindro una mezcla aire-combustible.

El fenómeno *backfire* aparece solamente cuando el combustible ya está cargado en los conductos de admisión. Este fenómeno puede darse debido a:

- Puntos calientes en la cámara de combustión. Partículas de contaminación calientes, la bujía, gases de residuales o las válvulas de escape pueden ser el origen de una combustión indeseada del hidrógeno. Esto ocurre debido a la baja energía de ignición del hidrógeno.
- Energía residual del circuito de encendido. Es posible que la bujía no este encendida totalmente pero que tenga cierta energía que permita la combustión de la mezcla. Si ésta se da durante la admisión, puede ocurrir el *backfire*.
- Inducción del cable del encendido. Que el encendido de otra bujía induzca encendido en una no deseada.

- Una combustión persistente que continúa mientras se abren las válvulas de admisión.
- Pre-encendido. En la compresión se pueden crear puntos calientes (hot spot) que enciendan la mezcla indeseadamente. Si esto ocurre relativamente pronto, puede llevar al *backfire*.

Si se abren los inyectores después de que cierra la válvula de escape durante la carrera de admisión, siguiendo el periodo de cruce de válvulas, se conseguirá diluir y refrigerar los gases de escape en el volumen residual y minimizar el riesgo de *backfire* obligando a que la mezcla no se ponga en contacto con los gases calientes del escape. Para ello se debe buscar un diagrama de distribución que permita entrar primero aire fresco al cilindro durante la primera fase de la carrera de admisión de manera que lo refrigere antes de que comience la inyección de hidrógeno.

7.2.- Pre-ignición o pre-encendido

Se produce cuando la mezcla fresca se quema después de que la válvula de admisión se cierre y antes de que salte la chispa de la bujía de encendido. La existencia de puntos calientes, de tensiones residuales en las bujías de encendido o la elevada temperatura de los gases de escape pueden provocar la combustión espontánea e incontrolada de la mezcla aire/hidrógeno.

El fenómeno de *pre-encendido* es el que delimita las prestaciones en los motores de hidrógeno. Ocurre en la carrera de compresión provocando un brusco gradiente de presiones. El pre-encendido produce unos picos de presión muy altos además de notables oscilaciones acústicas. Estas elevadas presiones pueden causar serios daños en el motor.

Si se optimiza el flujo de refrigerante en la cabeza del cilindro para refrigerar los asientos de las válvulas de escape y las bujías se puede conseguir reducir la tendencia a que se produzca encendido superficial. Es la aparición de encendido superficial la que marca la máxima relación de compresión permitida e impone pues el límite para la máxima potencia que se puede obtener en H_2 -M.E.P, que es principalmente función del máximo dosado empleado.

7.3.- Detonación

En un motor de combustión interna con encendido provocado, el combustible y el aire se mezclan de manera homogénea en el conducto de admisión. Esta mezcla será quemada al final de la carrera de compresión del ciclo Otto, mediante la ignición por descarga eléctrica en la bujía.

En el caso de los MEP de gasolina la masa de la mezcla que se va quemando comprime fuertemente a la mezcla que queda por quemar. Ésta, bajo determinadas condiciones, puede auto-inflamarse produciéndose un salto brusco de presión y produciendo una pérdida de potencia y un calentamiento anormal del motor.

Se puede llegar al extremo de gradientes de presión suficientemente intensos, acompañados de quemaduras en los materiales expuestos a este fenómeno. También se le suele llamar “picado de biela” debido a que este elemento soporta gran parte del fenómeno. Estos gradientes tan intensos suelen producir un ruido característico perfectamente audible.

La detonación incrementa la transferencia de calor de los gases producto de la combustión a las superficies de la cámara de combustión, ya que genera temperaturas y presiones superiores a las normales. Este aumento de transferencia de calor promueve los puntos calientes dentro de la cámara de combustión. Estos puntos calientes pueden provocar los tres tipos de combustiones anómalas.

El avance al encendido es un factor de gran importancia en las detonaciones, si lo aumentamos respecto del óptimo las presiones y temperaturas máximas alcanzadas serán mayores. La posición de la bujía es también un factor influyente en el fenómeno de detonación. Conforme más a la periferia se encuentra la bujía de encendido mayor es el recorrido del frente de llama, con lo cual mayor son las posibilidades de una auto-ignición al otro lado del frente.

La zona de operación libre de detonación tiende a estrecharse conforme se aumenta la relación de compresión, esto se debe a la elevación de las presiones y temperaturas máximas. Este fenómeno representa una limitación práctica a la hora de mejorar la potencia efectiva y la eficiencia en los motores de hidrógeno.

8.- INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS

En el estudio de combustiones anómalas en el uso de hidrógeno como combustible, nos vamos a centrar en la variación del dosado. Para variar el dosado aumentaremos el tiempo de inyección mediante la regulación de la centralita.

Los datos que nos interesa obtener para la posterior caracterización de las combustiones anómalas serían la temperatura de admisión, presión en el cilindro, régimen de giro y el sonido. La obtención de datos es registrada mediante el sensor de presión, la centralita, el banco de pruebas y la instrumentación de sonido.

8.1.- BANCO DE PRUEBAS

Se trata de un banco de ensayos de la marca AVL Iberica, el modelo 80, en el se puede modificar el punto de trabajo una vez caracterizada la centralita, regula el régimen de giro y el par motor.

Los componentes esenciales de los que se compone son el freno dinamométrico que absorbe la potencia desarrollada por el motor, ofreciendo una resistencia al giro de éste, y que está provisto de un dispositivo para medir el par motor. Transmisión que permite la conexión freno-motor con una cierta elasticidad y capacidad de absorber desalineaciones. Por último un sistema de alimentación de comburente al motor con instrumentos de medición de consumo.

8.2.- CENTRALITA

El control de los parámetros de funcionamiento del motor, los mapas, se realiza mediante una centralita Motec M400 y su respectivo programa para poder modificarlos. Mediane su uso podemos regular el tiempo de inyección de carburante, así regulamos el dosado. Además la centralita es la que recibe los datos de los sensores que vienen en el motor comercial, de esta manera podemos observar la temperatura en el colector de admisión.



Figura 8.2.1.- Centralita MOTEC M400

8.3.- SENSOR DE PRESIÓN

El equipo consta de una bujía instrumentada Kistler que lleva un sensor de presión piezoeléctrico y un encoder Kistler. El encoder da dos señales una de “trigger” que sirve para el comienzo de la medición y la otra señal que es un pulso cada medio grado de giro del cigüeñal.

La puesta a punto del equipo exige conocer con gran precisión la posición del punto muerto superior P.M.S. del pistón del cilindro donde se va a instalar la bujía instrumentada. Para ello se cuenta con un sensor capacitivo Kistler que indica con suficiente precisión la posición de P.M.S. La señal de ese sensor se ha de poner en fase con la señal del “trigger” del encoder con un osciloscopio y así se puede referenciar la señal del sensor de presión a la posición angular del cigüeñal del motor.



Figura 8.3.1.- Bujía instrumentada Kistler.



Figura 8.3.2.- Detalle del encoder Kistler colocado en el motor y sensor capacitivo de P.M.S. Kistler.

8.4.- INSTRUMENTACIÓN DE SONIDO

Las grabaciones para la identificación mediante sonido de las combustiones anómalas se llevaron a cabo con una frecuencia de muestreo de 44,1 KHz y 32 bits de resolución. El dispositivo experimental para la obtención de datos de sonido consta del siguiente hardware profesional:

Pc portátil con software libre Audacity (códec ASIO): Un portátil con el software libre de Audacity, este es un editor de grabación y edición de sonido libre, de código abierto y multiplataforma. Mediante el códec ASIO podemos convertir los archivos de audio al formato que se desee, para poder conectar la tarjeta de sonido.

Tarjeta de sonido Echo AudioFire 12: Placa profesional. 12 entradas y 12 salidas plug con convertidores de hasta 192 kHz con 128x oversampling. Permite monitoreo por hardware sin latencia y además agrega entrada y salida MIDI.



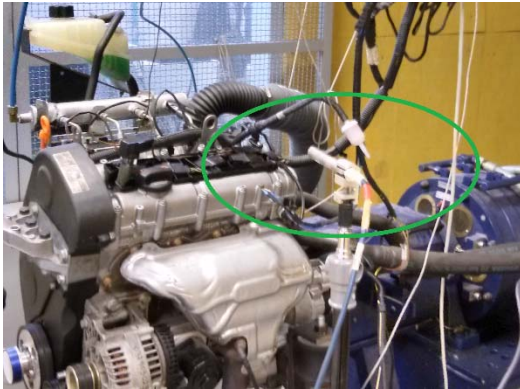
Figura 8.4.1.- Tarjeta de sonido Echo AudioFire 12

Preamplificador Norsonic 335: dos preamplificadores para los micrófonos con una alimentación de 28 VDC con 8 canales cada uno. Acepta una gama de medición de 20-140 dB cuando se calibra para 50 mV.



Figura 8.4.2.- Preamplificador doble Norsonic 335

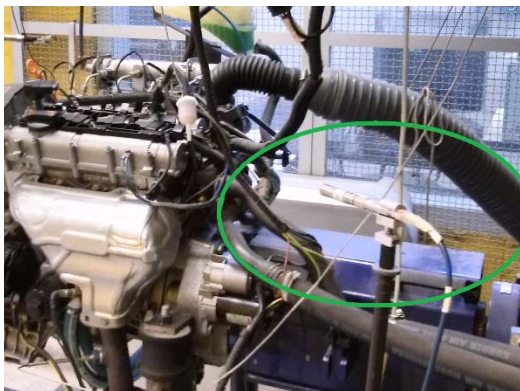
Micrófonos GRAS omnidireccionales (respuesta en frecuencia plana): la gama de transductores para la medida de ruido de mayor calidad en el mercado, y suponen una referencia a nivel mundial en el campo de la acústica. Para la correcta medición se situaron 4 micrófonos, uno en la salida de escape y los demás alrededor del motor.



Micrófono 1 situado cerca del colector de escape



Micrófono 3 situado cerca del colector de admisión



Micrófono 2 situado cerca de la transmisión al freno dinámico



Micrófono 4 situado cerca de la salida del escape

9.- DESARROLLO, OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Los ensayos han sido realizados tras la preparación, con el mayor esmero posible, de todos los instrumentos de medición y del banco de ensayos, que es el que monitoriza el funcionamiento del motor. Se han realizado una serie de ensayos quedándonos con los que nos parece que conllevan un mejor seguimiento de los fenómenos producidos en el interior del motor.

Estos ensayos se realizaron a dos régimen de revoluciones diferentes, a 2000 y 2500 revoluciones por minuto, para así poder estudiar la influencia de dicho parámetro. No se han realizado con un régimen mayor debido a la posibilidad de un deterioro severo de los componentes, por precaución.

La variación que se produce en la inyección, el tiempo de inyección de combustible, solo se ha realizado en un solo cilindro. Esto se debe a que este estudio esta basado, en parte, en detonaciones, que perjudican fuertemente el estado de las piezas. Las piezas mecánicas de un motor son resistentes pero a la vez deben de mantener un estado optimo debido al contacto continuo entre ellas.

Se realizaron con un punto de trabajo a plena carga, lo que implica la apertura total de la mariposa que regula el paso de gases de admisión. Con un ángulo de comienzo de inyección de 338° BTDC (Before Top Dead Center = Antes del punto muerto superior o PMS en la carrera de compresión) o 22° ATDC (After TDC = tras el PMS en la carrera de admisión). Además de un avance al encendido de 10° para ambos ensayos, 2000 y 2500 r.p.m.

Los gráficos de las presiones tanto acústicas como las producidas en el seno de la cámara de combustión se han realizado mediante Matlab, de esta manera podemos observar de manera más sencilla el conjunto de datos obtenidos mediante los sensores.

Los datos más relevantes en este estudio son principalmente:

- **Tiempo de inyección de combustible:** es el tiempo en milisegundos en los que el inyector se encuentra abierto e introduciendo combustible (hidrógeno) en cada uno de los colectores de admisión. De ello depende el dosado de los gases de admisión.
- **Régimen de giro del motor:** son las revoluciones por minuto a las que gira el cigüeñal. De este factor depende la entrada de aire y la potencia del motor.
- **Presión en del cilindro:** es la presión en kilo Pascales que encontramos en el interior de la cámara de combustión. Esta presión es importante cuando nos encontramos en la carrera de compresión y de expansión, sobretodo cuando se produce la combustión de los gases.
- **Temperatura en el colector de admisión:** es la temperatura a la que se encuentra los gases frescos, medida en grados Celsius. Es importante debido a la densidad, al aumentar la temperatura disminuye la entrada de masa de los gases.
- **Presión creada por las ondas de sonido:** es la variación alterna en la presión estática del aire, nos sirve para poder identificar los sucesos que aparecen en función de la presión que estos ejercen sobre el motor.
- **Frecuencia de las ondas de sonido:** es la cantidad de vibraciones que emite una fuente sonora por unidad de tiempo, nos permite identificar los sucesos en función de la frecuencia mecánica con la que se producen.

Mediante el programa de la propia centralita, Motec M400, se obtienen una serie de parámetros además de los ya descritos anteriormente, a excepción de los de sonido. En la siguiente gráfica, extraída de dicho programa, se puede observar todas las pruebas realizadas para el posterior estudio de las combustiones anómalas. Las dos últimas pruebas son las realizadas a 2500 r.p.m., las demás se realizaron a 2000 r.p.m.

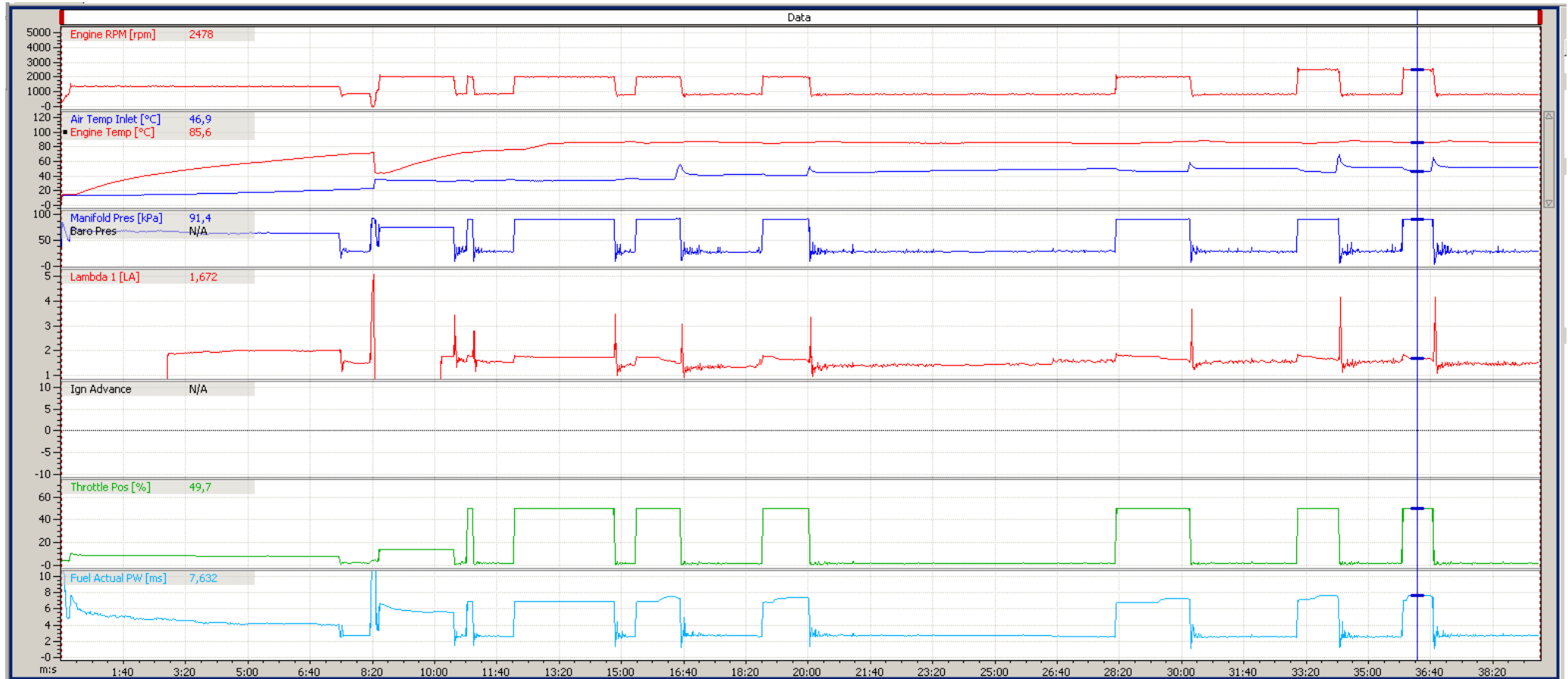


Figura 9.0.1 Gráfica obtenida por el programa Motec con todos los ensayos realizados

9.1.- PRUEBA REALIZADA A 2000 RPM

Si hacemos zoom en este programa sobre un ensayo realizado a 2000 revoluciones por minuto podemos observar los parámetros en condiciones normales y cuando se producen estos sucesos que vamos a estudiar.

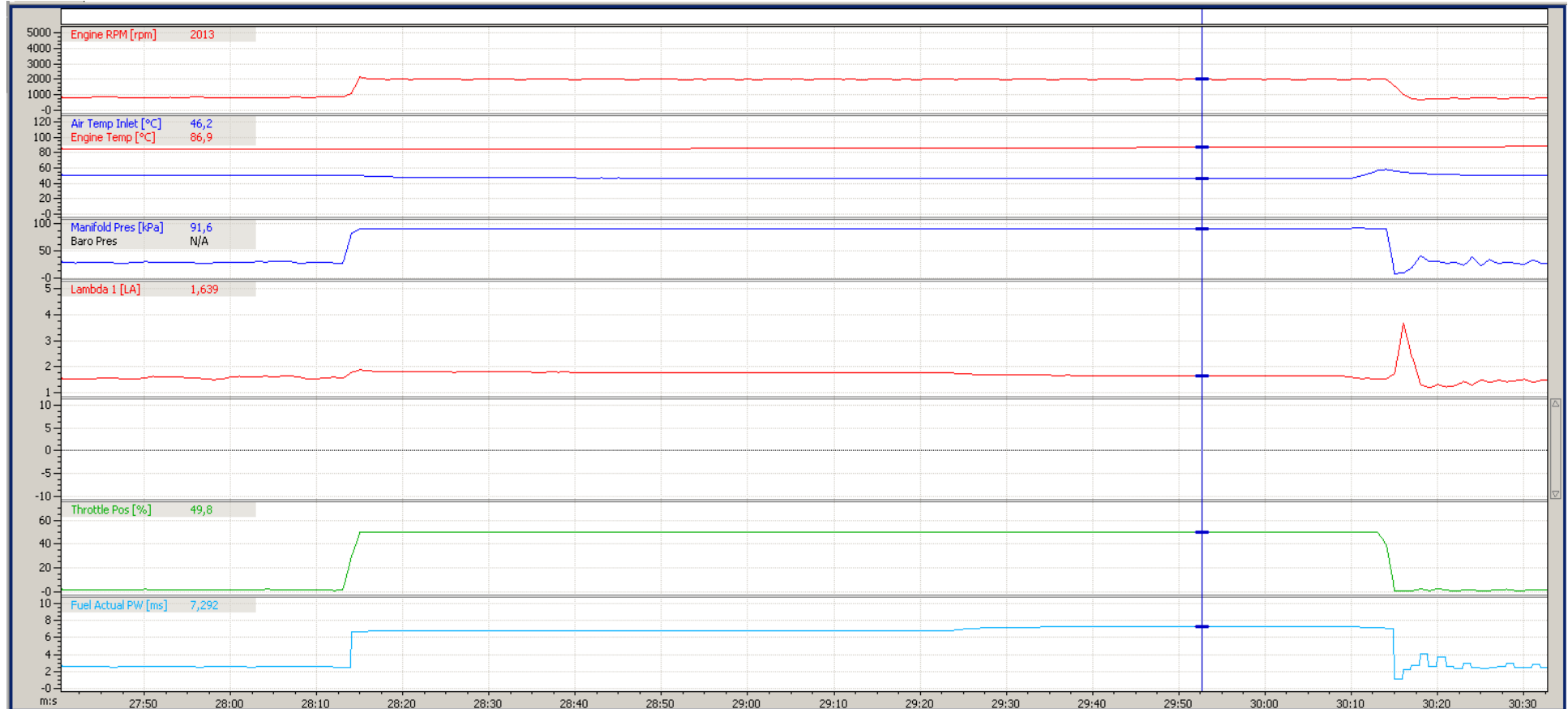


Figura 9.1.1 Gráfico obtenido por el programa Motec para el ensayo de 2000 r.p.m.

En la figura 9.1.2 tenemos la representación del ensayo completo, con los gráficos de presión en el cilindro, presión de audio y audio filtrado. Debido a que los micrófonos 1, 2 y 3 tienen una señal muy parecida y a que el número 4 es muy diferente por la salida de gases de escape, hemos elegido la señal del primero para caracterizar las anomalías. Con el micrófono número 1 obtenemos la variación en la presión estática del aire creada por el motor, esta variación es tanto positiva como negativa, ondas.

El gráfico de presión en el aire, parametrizado, es el segundo, pero no se distinguen bien las detonaciones. Por ello realizamos un filtrado paso alto de las frecuencias por debajo de 3000 Hz. De esta manera podemos visualizar a simple vista las detonaciones (en el tercer gráfico) y además poder sincronizar la señal de audio con la de presión en el cilindro número 1.

Por último tenemos una gráfica de la señal de audio medida en decibelios, una magnitud representativa de la percepción del oído respecto a la presión de sonido.

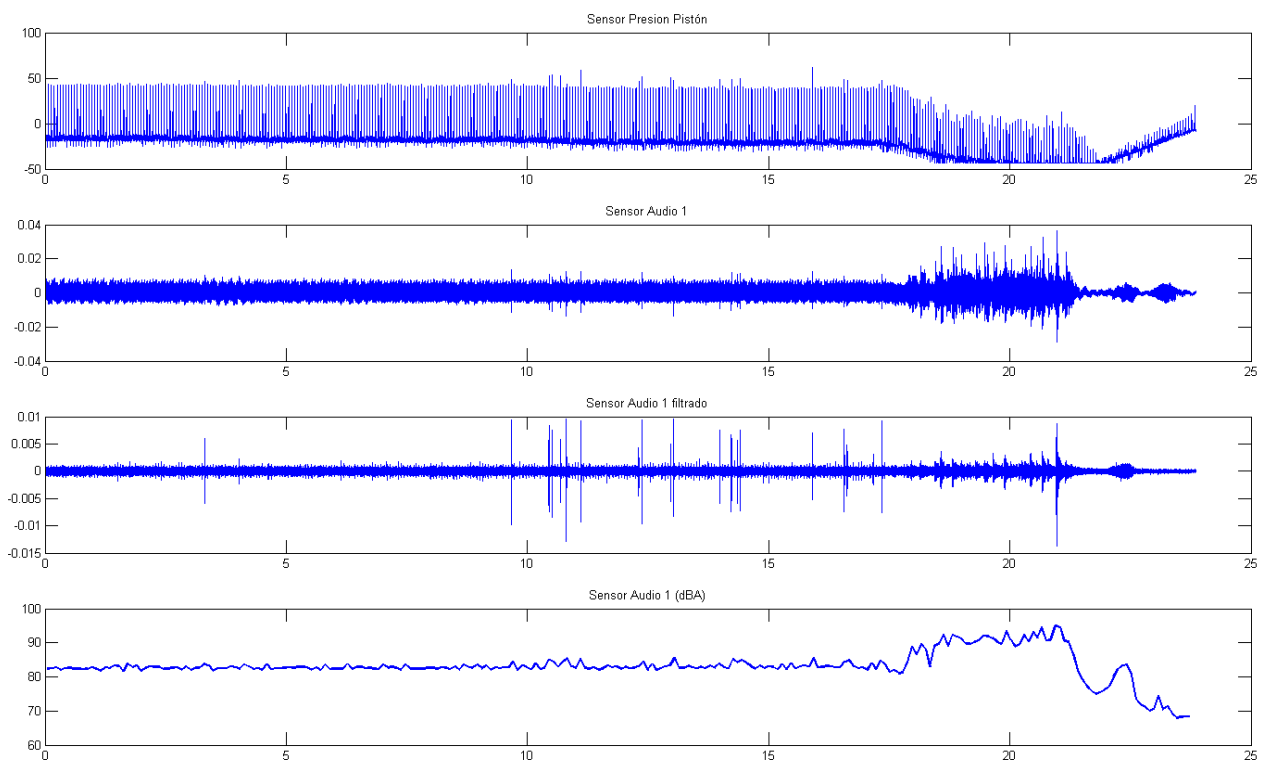


Figura 9.1.2 Gráficas de presión en el cilindro, presión de sonido, presión filtrada y decibelios

Desde el mismo programa de la Motec podemos extraer los datos exactos en función del tiempo, estos están representados en la siguiente tabla. El programa recoge los datos cada 0,2 grados de giro del cigüeñal, si nos encontramos a 2000 r.p.m. el cigüeñal gira 12° en un milisegundo. Esta precisión será necesaria para evaluar la presión más adelante. Para ver como varían el tiempo de inyección y la temperatura en el colector es suficiente con tomar una medida cada segundo.

Los datos del tiempo de inyección que extraemos del programa son la media de los 4 cilindros del motor. El programa recibe los datos de los 4 inyectores y como se supone que se usan de igual forma hace la media.

min : seg	r.p.m.	presión (kPa)	temperatura en el colector de admisión (°C)	tiempo de inyección (ms)
28 : 14	1095	83	50,2	6,62
28 : 15	2143	91,3	50	6,702
28 : 16	2024	91,3	49,4	6,74
28 : 17	2005	91,2	49	6,746
28 : 18	1989	91,4	48,7	6,75
28 : 19	1994	91,5	48,3	6,76
28 : 20	1994	91,5	48,2	6,768
28 : 21	1989	91,3	48	6,784
28 : 22	2002	91,5	47,9	6,788
28 : 23	2018	91,5	47,7	6,78
28 : 24	1999	91,3	47,7	6,788
28 : 25	1998	91,6	47,7	6,782
28 : 26	1995	91,6	47,7	6,76
.
.
.
29 : 20	1988	91,5	46,3	6,758
29 : 21	2018	91,5	46,3	6,764
29 : 22	2015	91,3	46,3	6,77

Tabla 9.1.1 Comportamiento en condiciones normales

Estos datos corresponden a ciclos del motor trabajando en condiciones normales, a unas 2000 r.p.m., un tiempo de inyección de 6,75 milisegundos y una temperatura de entrada de los gases frescos que disminuye hasta los 46,3°.

Este cambio, en la temperatura de los gases de entrada, se debe al incremento de 1000 a 2000 r.p.m. Los gases frescos entran con un caudal mayor, de manera que no les da tiempo a calentarse tanto como antes en los alrededores de la cámara de combustión.

A partir de este momento, minuto 29:23 del ensayo, introducimos un aumento del tiempo de inyección en el cilindro número 1 del 30% aproximadamente.

min : seg	r.p.m.	presión (kPa)	temperatura en el colector de admisión (°C)	tiempo de inyección (ms)
29 : 23	2001	91,6	46,2	6,818
29 : 24	1991	91,5	46,1	6,934
29 : 25	1992	91,4	46,1	7,05
29 : 26	1994	91,3	46,1	7,1
29 : 27	2003	91,5	46,2	7,136
29 : 28	2017	91,5	46,1	7,168
29 : 29	1995	91,4	46,3	7,18
29 : 30	1972	91,5	46,2	7,192
29 : 31	2003	91,6	46,3	7,206
29 : 32	2010	91,4	46,3	7,212
29 : 33	2004	91,6	46,3	7,22
29 : 34	2003	91,6	46,2	7,232
29 : 35	1981	91,6	46,3	7,232
29 : 36	1990	91,7	46,3	7,25
29 : 37	2021	91,8	46,3	7,254
29 : 38	2015	91,5	46,3	7,256
29 : 39	1994	91,6	46,3	7,282
29 : 40	1986	91,7	46,3	7,276
29 : 41	1996	91,6	46,3	7,274
29 : 42	2003	91,5	46,3	7,27
29 : 43	2011	91,7	46,2	7,3
29 : 44	2000	91,5	46,2	7,302
.
.
.
30 : 07	2008	91,6	46,1	7,314
30 : 08	2004	91,5	46,1	7,306
30 : 09	1948	91,6	46,1	7,28

Tabla 9.1.2 Comportamiento al aumentar el dosado un 30%

El tiempo de inyección aumenta al principio de esta parte de 6,75 ms a 7,3 ms. La temperatura en el colector se mantiene estable en los 46°, al igual que el régimen de giro, unas 2000 r.p.m. El régimen de giro se mantiene estable gracias al banco de potencia. Al final de esta parte del ensayo es donde se produce el fenómeno de las detonaciones, también llamado picado de bielas.

En las siguientes gráficas podemos observar un ciclo con una combustión normal, producida a 2000 r.p.m., comparado con otro en el cual aparece el fenómeno de la detonación. La gráfica de presión en el cilindro en la que aparece la detonación, presenta la diferencia con el ciclo normal cuando el pistón esta cerca de alcanzar el P.M.S., es aquí donde encontramos la combustión anormal con picos de presión muy elevados y frecuencias muy altas.

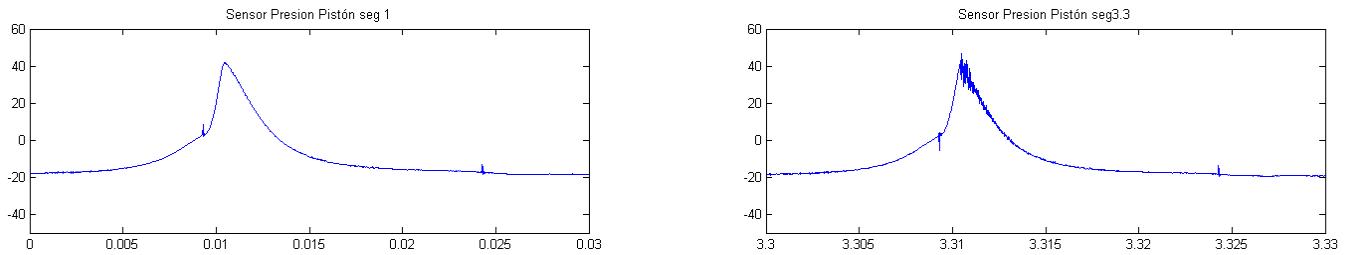


Figura 9.1.3 Comparación de presión en el cilindro n°1 (normal-detonación)

La gráfica de presión de sonido aparece desfasada respecto de la presión en el cilindro debido a una sincronización algo errónea, aun así podemos observar el gran aumento, que crea el fenómeno de detonación, de dicha magnitud.

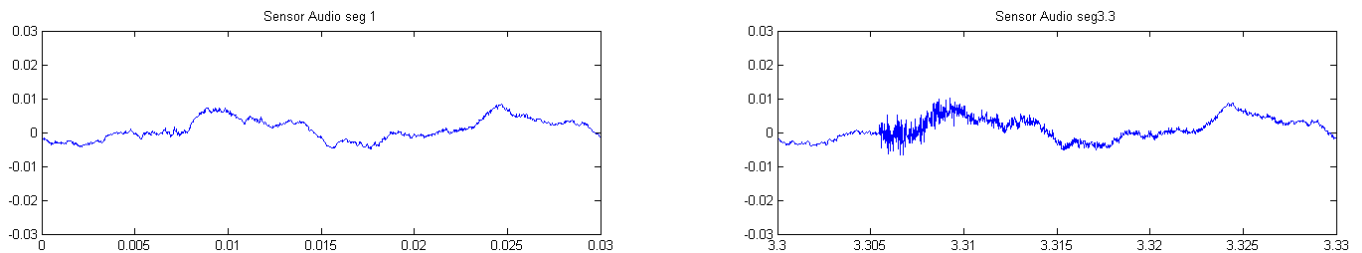


Figura 9.1.4 Comparación de presión de sonido (normal-detonación)

En el espectro de frecuencias de las ondas de sonido podemos analizar que las ondas que han aumentado su presión son las de altas frecuencias, a partir de 1000 Hz. Esto representa el ruido característico de las detonaciones tan agudo (“clicks”).

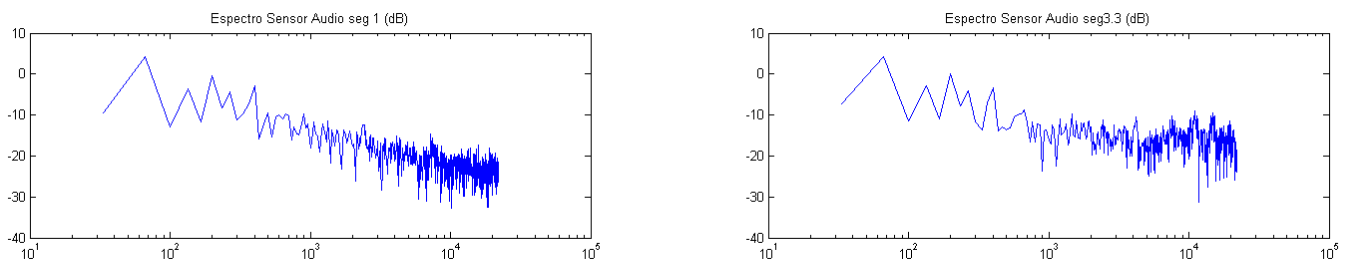


Figura 9.1.5 Comparación del espectro de sonido (normal-detonación)

En este instante, minuto 30:10 de la prueba, es donde se detecta el aumento de la temperatura en el colector de admisión tan brusco, de 46°C hasta 58°C, esto nos da pie a definir este suceso como backfire. La temperatura del colector de admisión se recoge en la zona de remanso pero lo más cerca posible del colector del cilindro número 1, de tal manera que la temperatura en el colector cerca de la válvula será mayor.

A este fenómeno le sigue un descenso severo en el régimen de giro del motor, lo que significa que el banco no consigue regular de ningún modo la potencia para mantenerlo. La presión disminuye proporcionalmente al régimen de giro ya que el pistón no crea el mismo vacío y entran menos gases frescos. El tiempo de inyección también disminuye puesto que el banco de ensayos lo que regula es el dosado.

min : seg	r.p.m.	presión (kPa)	temperatura en el colector de admisión (°C)	tiempo de inyección (ms)
30 : 10	1996	91,9	46,6	7,28
30 : 11	2011	92,5	49,6	7,23
30 : 12	1983	91,5	52,5	7,196
30 : 13	2017	91,6	56,7	7,134
30 : 14	1993	91,1	58,1	7,002
30 : 15	1565	7,6	56,2	1,112
30 : 16	1021	9	54,5	2,184
30 : 17	733	18,7	53,5	2,688
30 : 18	683	40,8	52,8	4,08
30 : 19	727	30,5	52,3	2,56
30 : 20	711	30,6	51,8	3,68
30 : 21	754	26,8	51,5	2,61
30 : 22	801	28,8	51,3	2,35
30 : 23	716	23,1	50,9	2,946
30 : 24	788	37,6	50,9	2,476
30 : 25	771	21,9	50,7	2,374
30 : 26	809	34	50,6	2,494
30 : 27	766	26	50,5	2,526
30 : 28	758	29,3	50,4	2,934
30 : 29	821	27	50,3	2,42
30 : 30	788	24,3	50,2	2,414
30 : 31	758	33,1	50,2	2,78
30 : 32	800	27	50,1	2,5
30 : 33	797	27	50	2,49
30 : 34	811	28,1	50,1	2,496
30 : 35	785	28,7	50	2,52
30 : 36	790	26	50	2,47

Tabla 9.1.3 Comportamiento bajo el fenómeno de backfire

En las siguientes gráficas vamos a realizar observaciones sobre las presiones y el ruido producidos en una serie de ciclos mediante comparaciones con un comportamiento normal y con la sucesión de fenómenos que prosiguen a las detonaciones.

En estas se puede ver la última detonación del ensayo, a esta le sigue el proceso de backfire, que finalmente consigue perder la potencia regulada por el banco de pruebas, esto significa la caída del régimen de giro y de la presión.

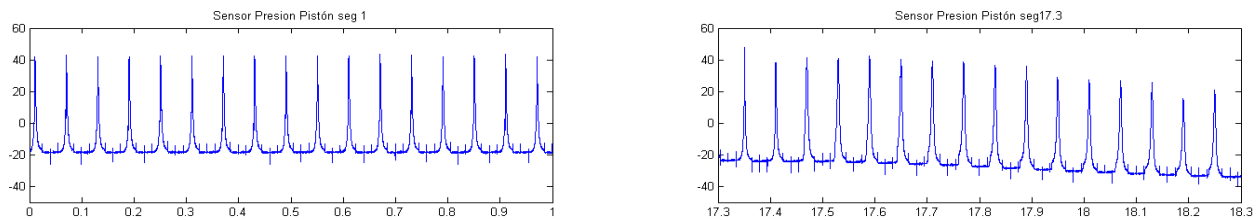


Figura 9.1.6 Comparación de presión del comportamiento normal con la aparición del backfire

Si nos fijamos en las presiones producidas en las ondas de sonido podemos observar claramente la última detonación, seguido del proceso de backfire que no produce grandes presiones. Finalmente la caída de la potencia por completo que al intentar los otros tres cilindros restaurar el régimen produce un ruido con gran intensidad.

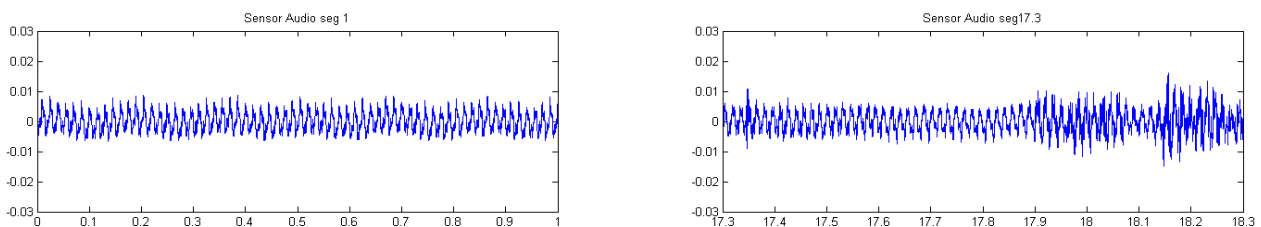


Figura 9.1.7 Comparación de presión de sonido del comportamiento normal con la aparición del backfire

Del espectro de sonidos podemos decir que el aumento de presión aparece en las ondas de baja frecuencia, entre 100 y 700 Hz. Representa el ruido grave tan fuerte que percibíamos en los ensayos.

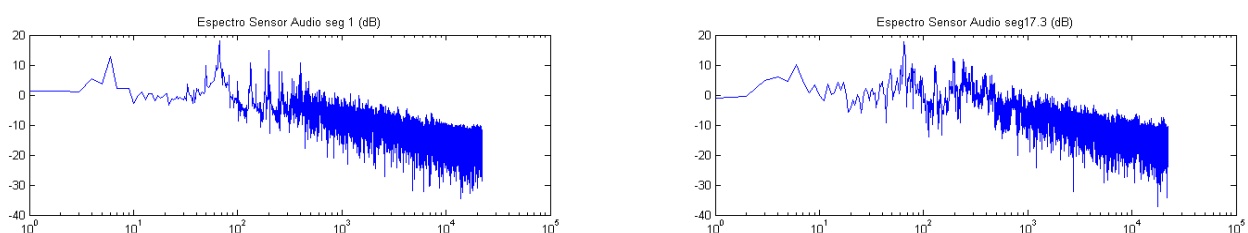


Figura 9.1.8 Comparación del espectro de comportamiento normal con la aparición del backfire

En la siguiente gráfica se ve un escalon de aumento de presión en el cilindro bastante antes de lo habitual. Este proceso es el que podemos definir como backfire.

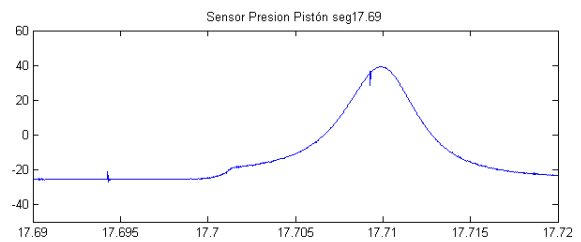
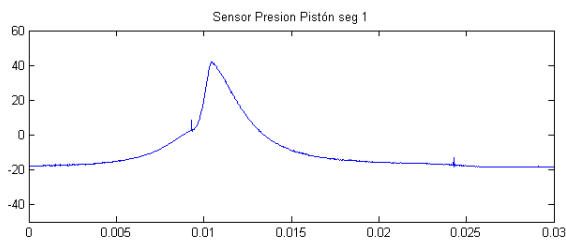


Figura 9.1.9 Comparación de presión del ciclo normal con un ciclo con comienzo de backfire

Por último tenemos los gráficos en los que el backfire es tan fuerte que la pérdida de potencia, presión y régimen de giro son inevitables.

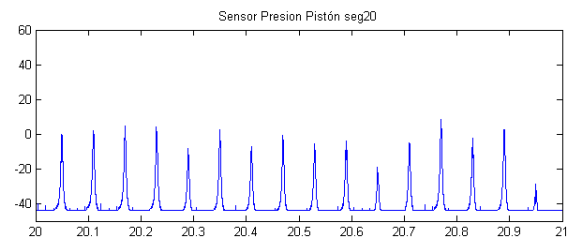
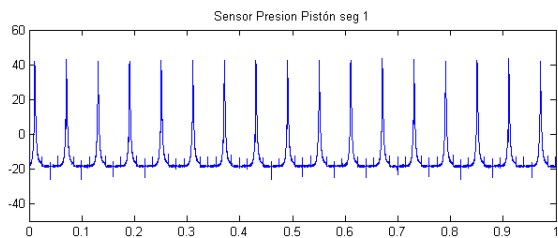


Figura 9.1.10 Comparación de presión del comportamiento normal con el backfire establecido

Las presiones en el sonido son muy superiores y según el espectro de sonido el aumento proviene de frecuencias bajas, entre 100 y 700 Hz. Producen un ruido ronco con gran nivel acústico.

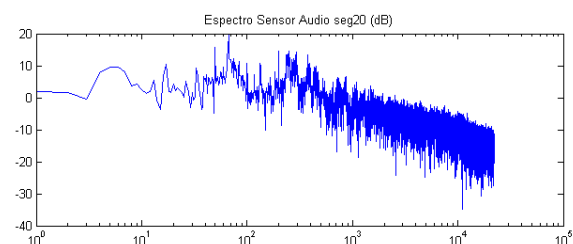
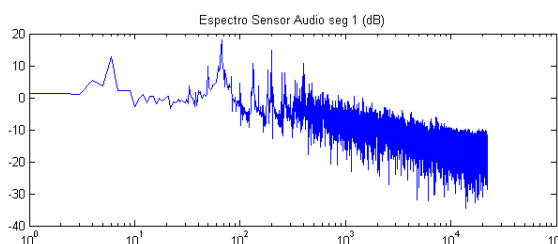
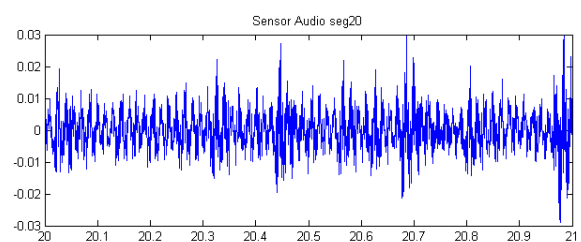
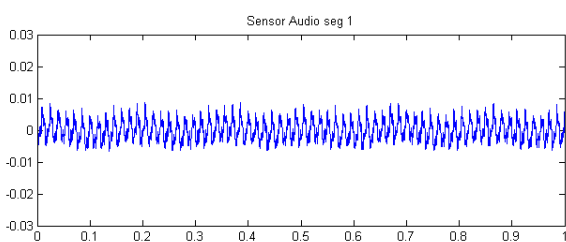


Figura 9.1.10 Comparación de presión y del espectro de sonido de un comportamiento normal con el backfire establecido

El proceso de backfire tan fuerte se puede ver en la siguiente gráfica, en ella se ve la pérdida de presión tan acusada debido a el descenso del regimen de giro. También podemos señalar el aumento de presión tan continuo desde el comienzo de la carrera de compresión, es un aumento muy superior al normal.

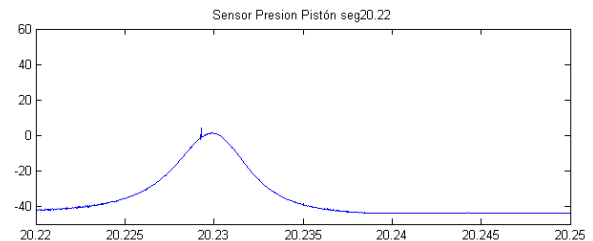
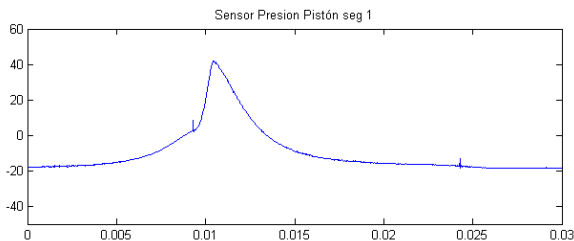


Figura 9.1.11 Comparación de presión del ciclo normal con un ciclo con backfire establecido

Una vez vistos todos estos datos con sus fenómenos correspondientes podemos analizar la situación. Al aumentar el dosado aumentamos las presiones y las temperaturas máximas producidas en el ciclo indicado, con lo que aumentamos las posibilidades de detonación. Pero en el punto de trabajo en el que nos situamos no deberían aparecer este tipo de fenómenos.

Al aparecer las detonaciones aumenta mucho la temperatura dentro de la cámara de combustión, transfiere un calor muy elevado a todos los materiales en contacto elevando su temperatura: válvulas, bujías, pistón, paredes del cilindro...

Debido a la elevada temperatura de las piezas se produce la auto-inflamación de la mezcla fresca y si a su vez la válvula de admisión se encuentra abierta encontramos el retroceso de llama por el colector de admisión, backfire.

El backfire produce un esfuerzo de expansión en la carrera de compresión y finalmente consigue perder la potencia del motor, de los otros tres cilindros, además de crear un deterioro de los elementos muy elevado.

9.2.- PRUEBA REALIZADA A 2500 RPM

Para el estudio de los fenómenos a 2500 r.p.m. me voy a centrar en la penúltima prueba realizada, la cual se puede divisar en el gráfico siguiente, en el que se percibe que los parámetros se amplifican.

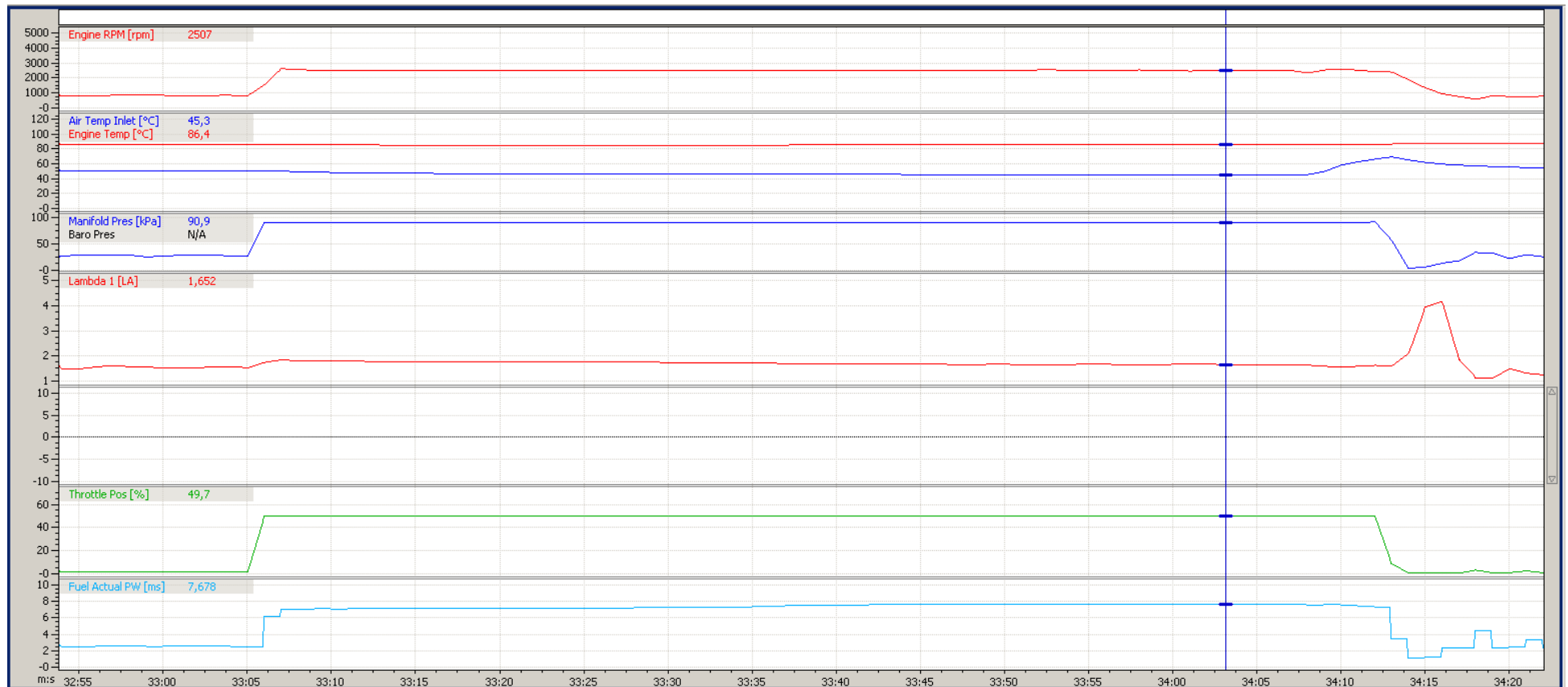


Figura 9.2.1 Gráfico obtenido por el programa Motec para el ensayo de 2500 r.p.m.

Extraemos los datos exactos en función del tiempo, estos están representados en la siguiente tabla. Se corresponden a ciclos del motor trabajando en condiciones normales, a unas 2500 r.p.m., un tiempo de inyección de 7,1 milisegundos y una temperatura de entrada de los gases frescos que disminuye hasta los 45.9°. Este cambio en la temperatura de los gases de entrada se debe al incremento de 1000 a 2500 r.p.m. al igual que en el caso anterior.

min : seg	r.p.m.	presión (kPa)	temperatura en el colector de admisión (°C)	tiempo de inyección (ms)
33 : 06	1544	91,7	50,6	6,15
33 : 07	2623	90,6	50,1	7,07
33 : 08	2543	91,3	49,3	7,104
33 : 09	2525	91,1	48,7	7,108
33 : 10	2513	91,2	48,3	7,102
33 : 11	2511	90,9	47,9	7,12
33 : 12	2505	91,4	47,7	7,118
33 : 13	2510	90,7	47,5	7,114
33 : 14	2509	91,3	47,3	7,124
33 : 15	2519	91,2	47,1	7,12
33 : 16	2511	90,9	47	7,118
33 : 17	2491	91,1	46,8	7,124
33 : 18	2496	91,2	46,7	7,122
33 : 19	2487	90,8	46,7	7,126
33 : 20	2484	91,4	46,7	7,126
33 : 21	2491	91	46,6	7,11
33 : 22	2501	90,9	46,5	7,146
33 : 23	2484	91,2	46,4	7,194
33 : 24	2495	90,8	46,3	7,204
33 : 25	2511	91,1	46,3	7,198
33 : 26	2507	91,3	46,2	7,208
33 : 27	2513	90,8	46,2	7,208
33 : 28	2503	91,1	46,1	7,232
33 : 29	2487	91,3	46,1	7,282
33 : 30	2480	91	46,1	7,282
33 : 31	2500	91,4	46	7,3
33 : 32	2506	91	46	7,316
33 : 33	2506	91,1	45,9	7,304
33 : 34	2503	91,5	45,9	7,336

Tabla 9.2.1 Comportamiento en condiciones normales

A partir de este momento, minuto 33:35 del ensayo, introducimos un aumento del tiempo de inyección en el cilindro número 1 del 30% aproximadamente. La temperatura en el colector se mantiene estable en los 45°C, al igual que el régimen de giro, unas 2500 r.p.m. El tiempo de inyección aumenta de 7,1 ms a casi 7,7 ms.

min : seg	r.p.m.	presión (kPa)	temperatura en el colector de admisión (°C)	tiempo de inyección (ms)
33 : 35	2500	90,9	45,8	7,376
33 : 36	2474	91,3	45,8	7,464
33 : 37	2497	91,4	45,8	7,506
33 : 38	2488	90,7	45,8	7,56
33 : 39	2504	91,2	45,8	7,59
33 : 40	2520	91	45,8	7,596
33 : 41	2500	91,3	45,8	7,592
33 : 42	2504	91,4	45,7	7,608
33 : 43	2490	90,7	45,7	7,634
33 : 44	2485	91,2	45,6	7,646
33 : 45	2497	91,3	45,6	7,65
33 : 46	2501	90,8	45,5	7,65
33 : 47	2529	91,3	45,5	7,656
33 : 48	2505	91,2	45,5	7,656
33 : 49	2476	90,8	45,6	7,65
33 : 50	2490	91,4	45,6	7,656
33 : 51	2482	91,4	45,5	7,642
33 : 52	2535	90,9	45,5	7,648
33 : 53	2535	91,1	45,5	7,656
33 : 54	2481	91,2	45,5	7,632
33 : 55	2484	90,6	45,5	7,64
33 : 56	2486	91,4	45,5	7,66
33 : 57	2513	91,3	45,5	7,664
33 : 58	2535	90,8	45,5	7,676
33 : 59	2498	91,1	45,4	7,668
34 : 00	2494	91,1	45,3	7,662
34 : 01	2462	90,9	45,3	7,65
34 : 02	2495	91,5	45,3	7,668
34 : 03	2506	91	45,3	7,678
34 : 04	2510	90,7	45,3	7,666
34 : 05	2513	91,5	45,3	7,656
34 : 06	2483	91	45,2	7,662
34 : 07	2496	91,1	45,2	7,674
34 : 08	2333	91,3	45,4	7,506

Tabla 9.2.2 Comportamiento tras aumentar el dosado un 30%

En esta parte del ensayo es donde finalmente se produce el fenómeno del picado de bielas. Para poder visualizar este fenómeno utilizaremos la presión en el cilindro con la precisión descrita anteriormente. Podemos comparar un ciclo normal con uno de detonación. En la gráfica de detonaciones podemos ver el aumento tan severo y los picos de presión creados por la combustión incontrolada.

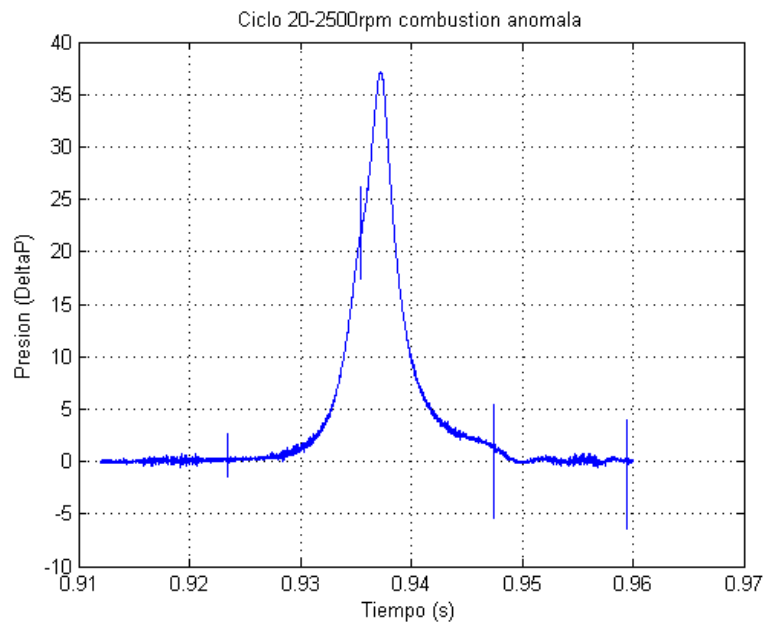


Figura 9.2.2 Ciclo indicado en condiciones normales

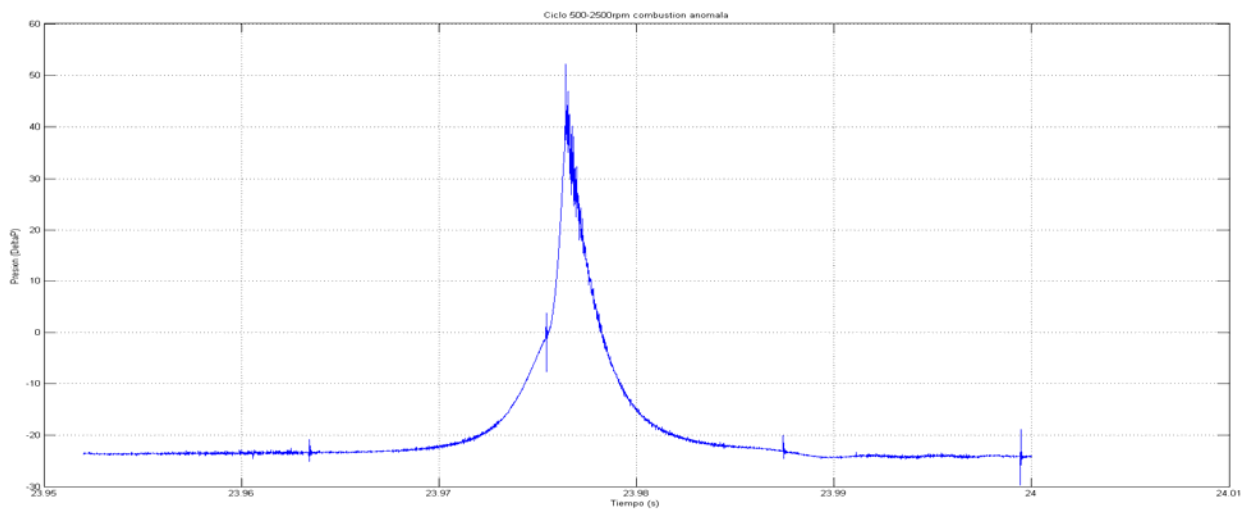


Figura 9.2.3 Ciclo indicado de una detonación

El análisis de sonido no se ha expuesto debido a que no hay diferencias con el ensayo a 2000 r.p.m. Lo que significa que obtenemos un aumento muy parecido en la presión de las ondas de sonido en el mismo rango de frecuencias, a partir de 1000 Hz.

En este punto, minuto 34:09 del ensayo, es donde se detecta el aumento de la temperatura en el colector de admisión, desde 45°C hasta 69°C, por el fenómeno de backfire. A este acontecimiento le sigue un descenso severo en el régimen de giro del motor, lo que conlleva la caída de presión y la disminución en el tiempo de inyección, por el tema del dosado.

min : seg	r.p.m.	presión (kPa)	temperatura en el colector de admisión (°C)	tiempo de inyección (ms)
34 : 09	2532	91,5	49,7	7,654
34 : 10	2566	90,8	58,1	7,506
34 : 11	2526	91,1	62,7	7,378
34 : 12	2420	92,3	66,3	7,34
34 : 13	2396	57	69,4	3,46
34 : 14	1881	3,1	65,2	1,04
34 : 15	1331	5,6	61,8	1,24
34 : 16	940	13	59,6	2,288
34 : 17	756	17,7	58,2	2,38
34 : 18	573	33,5	57,1	4,494
34 : 19	812	32,3	56,3	2,314
34 : 20	757	21,9	55,5	2,444
34 : 21	725	29,5	55	3,37
34 : 22	791	25,1	54,6	2,326
34 : 23	728	27,7	54,2	3,084
34 : 24	834	26,2	53,9	2,35
34 : 25	747	20,6	53,5	2,426
34 : 26	847	41,3	53,4	2,406
34 : 27	828	19,9	53,1	2,348
34 : 28	728	23,2	52,9	3,086
34 : 29	786	25,8	52,8	2,484
34 : 30	778	28	52,7	2,978
34 : 31	858	26,2	52,6	2,41
34 : 32	776	23,5	52,4	2,41
34 : 33	820	45,2	52,4	2,714
34 : 34	859	21,1	52,2	2,366
34 : 35	770	24,3	52,1	2,388
34 : 36	744	31,1	52,1	2,598
34 : 37	806	28,1	52	2,352
34 : 38	784	27,6	51,9	2,76

Tabla 9.2.3 Comportamiento bajo el fenómeno de backfire

En la siguiente gráfica podemos observar el aumento de presión con forma de escalón producido por el comienzo de el backfire a 2500 r.p.m.

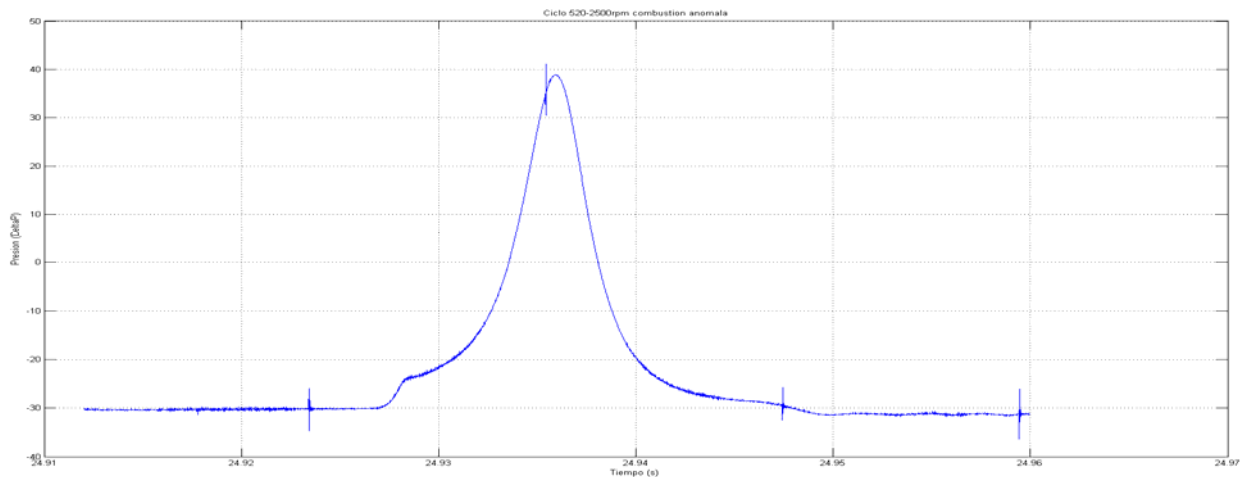


Figura 9.2.4 Ciclo indicado con el comienzo del fenómeno de backfire

En la siguiente representación podemos ver un ciclo en el que en la combustión se produce un backfire muy acusado, causante de la pérdida del régimen de revoluciones y potencia del motor.

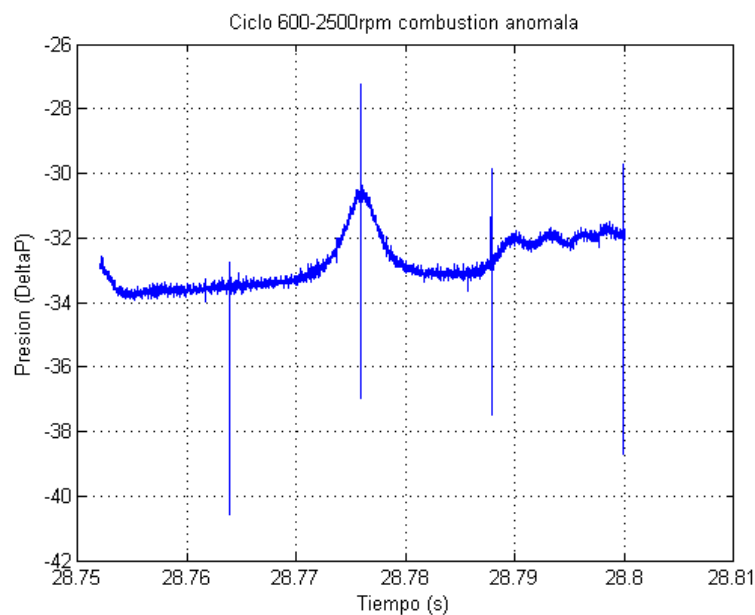


Figura 9.2.5 Ciclo indicado con el fenómeno de backfire ya establecido

Al igual que en el caso de detonaciones no se ha expuesto el análisis de sonido debido a la semejanza con el ensayo a 2000 r.p.m. De forma que en esta parte de la prueba abtenemos un gran aumento en la presión de sonido en bajas frecuencias, entre 100 y 700 Hz.

10.- PROCESADO DE DATOS

Anteriormente ya se ha comentado que los datos referidos al tiempo de inyección de combustible mostrados por el programa son la media de los 4 inyectores, uno por cada cilindro. Como solo se aumenta el tiempo de inyección (el dosado) en uno de ellos, el dato obtenido no es un dato real. El tiempo de inyección real quedaría así:

- En la prueba de 2000 r.p.m. hemos obtenido un aumento de 6,75 ms a 7,3 ms.

$$\text{tiempo real de inyección} = 6,75 \cdot \left(1 + 4 \cdot \frac{7,3 - 6,75}{6,75} \right) = 8,95 \text{ ms}$$

- En la prueba de 2500 r.p.m. hemos obtenido un aumento de 7,1 ms a 7,7 ms.

$$\text{tiempo real de inyección} = 7,1 \cdot \left(1 + 4 \cdot \frac{7,7 - 7,1}{7,1} \right) = 9,5 \text{ ms}$$

Los grados de giro del cigüeñal durante los que se encuentra inyectando combustible nuestro inyector número uno serán:

- En el ensayo a 2000 r.p.m.:

$$\text{Velocidad angular} = 2000 \text{ r.p.m.} \cdot \frac{360^\circ}{\text{rev}} \cdot \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{\text{s}}{1000 \text{ ms}} = 12^\circ/\text{ms}$$

$$\text{Grados de giro del cigüeñal (condiciones normales)} = 6,75 \cdot 12 = 81^\circ$$

$$\text{Grados de giro del cigüeñal (con aumento de dosado)} = 8,95 \cdot 12 = 107,4^\circ$$

- En el ensayo a 2500 r.p.m.:

$$\text{Velocidad angular} = 2500 \text{ r.p.m.} \cdot \frac{360^\circ}{\text{rev}} \cdot \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{\text{s}}{1000 \text{ ms}} = 15^\circ/\text{ms}$$

$$\text{Grados de giro del cigüeñal (condiciones normales)} = 7,1 \cdot 15 = 106,5^\circ$$

$$\text{Grados de giro del cigüeñal (con aumento de dosado)} = 9,5 \cdot 15 = 142,5^\circ$$

Si tenemos en cuenta que en ambos casos empezamos a inyectar 22° después del punto muerto superior en la carrera de admisión, podemos generar los siguientes gráficos sobre el punto de trabajo en el que nos encontramos:

- De esta forma podemos observar que en el caso de 2000 r.p.m. tenemos 92.1° entre el final de la inyección y el cierre (con un milímetro de holgura) de las válvulas en condiciones normales. Mientras que al aumentar el dosado un 30% tenemos solo 66° de giro de cigüeñal para introducir lo que queda de mezcla en el colector de admisión.

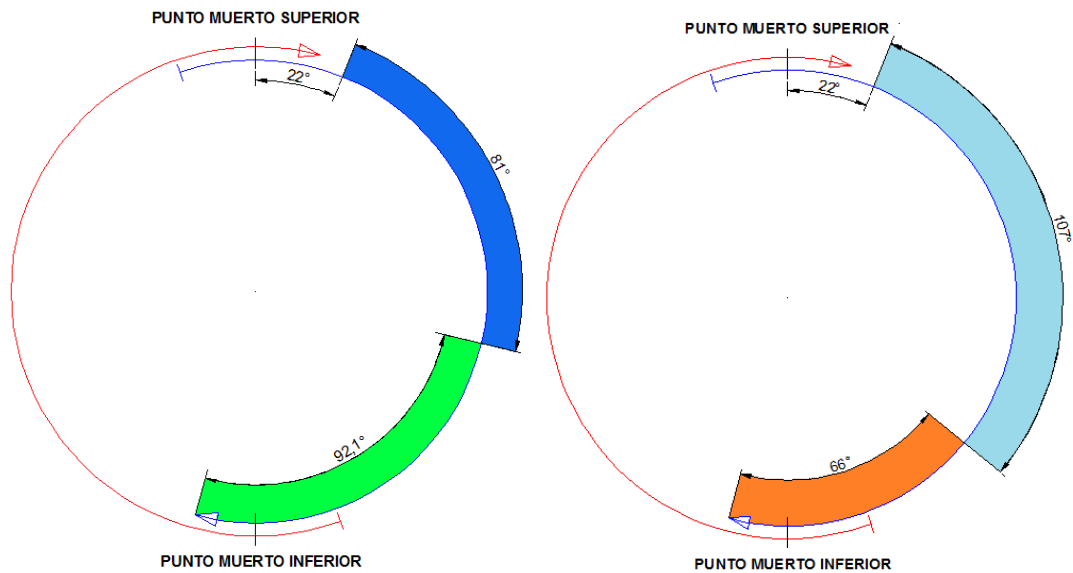


Figura 10.1. Comparativa de inyección en condiciones normales frente al aumento del dosado (2000r.p.m.)

- Mientras que para el caso de 2500 r.p.m. tenemos 66.6° y al aumentar el dosado un 30% solo hay 31° entre el final de la inyección y el cierre de las válvulas.

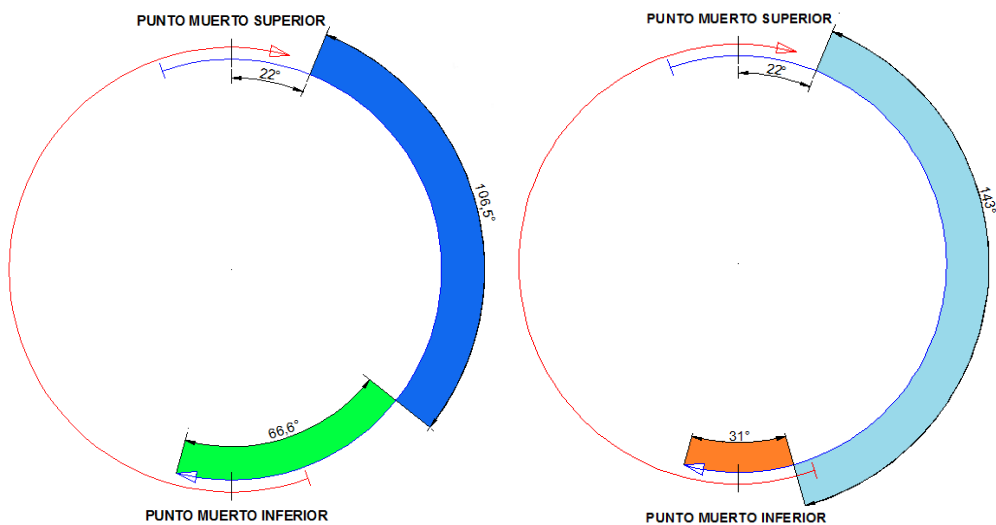


Figura 10.2. Comparativa de inyección en condiciones normales frente al aumento del dosado (2500r.p.m.)

11.- CONCLUSIONES

Como se puede observar en el apartado anterior, el tiempo que permite que entre a la cámara de combustión la última fracción de combustible inyectado disminuye bastante al aumentar el dosado, puesto que el tiempo de inyección es mayor. Esto puede ser un problema debido a que puede que el combustible no entre por completo en la cámara de combustión.

En el régimen de 2500 r.p.m. los ángulos de inyección son mayores, pero el régimen de giro en principio no debería ser un aliciente muy importante, debido a que también con un régimen superior los gases de entrada tienen un caudal mayor, introduciendo el combustible en un tiempo inferior.

El problema de que no entre todo el combustible en la cámara de combustión es que aparezcan unas bolsas de acumulación de combustible, las cuales entrarían al interior del cilindro creando así un dosado muy superior respecto al punto de trabajo en el que queremos funcionar.

Al aumentar el dosado nos acercamos a la mezcla estequiométrica, aumentando así la velocidad del frente de llama. Como aumentamos mucho el dosado, por culpa de las bolsas de acumulación, la velocidad del frente de llama es muy superior. Esto disminuye mucho el ángulo de combustión y además produce una mayor carga sobre el combustible sin quemar al otro lado del frente de llama. Como el avance al encendido no lo hemos modificado y como el hidrógeno tiene una mínima energía de ignición tan baja se producen detonaciones.

Al producirse las detonaciones aumentamos la temperatura de la cámara y de todos los componentes: bujía, válvulas, pistón cilindro... Esto potencia aún más la aparición de detonaciones puesto que la temperatura aumenta la velocidad del frente de llama.

Al aumentar tanto la temperatura se produce por encendido superficial o por puntos calientes tales como las válvulas o la bujía, la auto-inflamación de la mezcla fresca. Como tenemos esas supuestas bolsas de acumulación de combustible, al otro lado de la válvula de admisión, favorecemos por ambos lados el backfire. La combustión alcanza el colector de admisión, por eso vemos el aumento de la temperatura del colector.

En el momento en el que se cierra la válvula de admisión, nos encontramos en la carrera de compresión tras haberse producido el backfire, tenemos la entrada de gases frescos a una temperatura superior a la normal. Además en la cámara de combustión comenzamos el ciclo con parte de la mezcla en combustión, por eso aparece el escalón de presión en el ciclo indicado, realizando el trabajo en contradi dirección al giro del cigüeñal.

Finalmente estos procesos de backfire acaban venciendo a los otros tres cilindros y al banco de ensayos, que es el que intenta regular el régimen de giro, disminuyendo por completo la velocidad de giro del cigüeñal, junto con la presión y los rendimientos.

12.- LÍNEAS FUTURAS

Una vez caracterizados los fenómenos de detonación seguidos de backfire se podrían realizar diversos tipos de ensayos para mitigar estos sucesos que disminuyen la eficiencia del motor.

En primer lugar se podría modificar el avance al encendido, disminuyendo el grado de 10° respecto al punto muerto superior. Esta disminución afectaría aumentando el tiempo de combustión, debido a presiones y temperaturas máximas menos elevadas, pero a su vez el tiempo de retraso aumentaría en mayor medida.

El tiempo de retraso es el tiempo necesario para que una mezcla aire combustible se auto-inflame, estando a unas presiones y temperaturas determinadas.

Otro factor importante que podríamos variar sería el ángulo del comienzo de inyección, 22° después del punto muerto superior en la carrera de admisión. Si disminuiríamos este parámetro no tendríamos el problema de la acumulación de hidrógeno antes de la válvula de admisión, que sería el suceso causante de la reacción en cadena de detonaciones y backfire.

El problema en disminuir este ángulo radica en lo descrito anteriormente, que al abrir los inyectores antes de que cierre la válvula de escape durante la carrera de admisión, no se conseguirá diluir y refrigerar los gases de escape en el volumen residual y minimizar el riesgo de *backfire*. La mezcla se pondrá en contacto con los gases calientes del escape.

Para variar este parámetro se debe buscar un diagrama de distribución que permita entrar primero aire fresco al cilindro durante la primera fase de la carrera de admisión, de manera que lo refrigere antes de que comience la inyección de hidrógeno, pero que a su vez consiga introducir todo el combustible dentro de la cámara de combustión.

13.- BIBLIOGRAFÍA

- A STUDY OF THE COMBUSTION IN HYDROGEN-FUELLED INTERNAL COMBUSTION ENGINES. Sebastian Verhelst. Universiteit Gent.
- EL HIDRÓGENO. FUNDAMENTO DE UN FUTURO EQUILIBRADO. M. Aguer Hortal, A.L. Miranda Barreras. Ed Diaz de Santos.
- MÁQUINAS TÉRMICAS, MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS. Profesor: Carlos Sopena Serna
- SIMULACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN UN MCIA ALIMENTADO CON HIDRÓGENO; Josu Iriarte Labalde
- SIMULACIÓN Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL SOBRE COMBUSTIÓN BALANCES TÉRMICOS EN UN H2-MEP; Jorge Trobajo San Martín